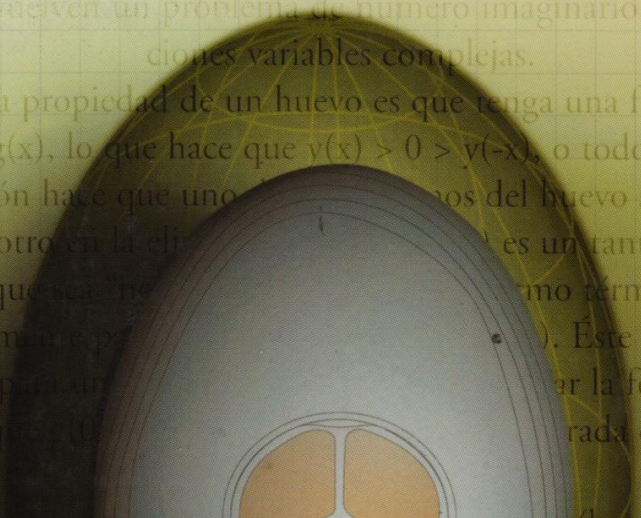
Claude Allègre

LA DERROTA DE PLATÓN O LA CIENCIA EN EL SIGLO XX



HUEVO $(x) = (1 - (x/a)^2)^{1/2} + (l) * (g(x) * (x^2 - a^2)$

SECCIÓN DE OBRAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LA DERROTA DE PLATÓN, O LA CIENCIA EN EL SIGLO XX

Traducción de
EMMA YOLANDA JIMÉNEZ LLAMAS

CLAUDE ALLÈGRE

La derrota de Platón, o la ciencia en el siglo XX

FONDO DE CULTURA ECONÓMICA
MÉXICO

Primera edición en francés, 1995
Primera edición en español, 2003

Comentarios y sugerencias: laciencia@fce.com.mx
Conozca nuestro catálogo: www.fce.com

Título original en francés:
La défaite de Platon: Ou la science du XXème siècle, © LIBRAIRIE ARTHEME FAYARD, Colección Le temps des sciences, París, 1995.
ISBN 2-213-59505-4

Creative Commons

D.R. ©, 2003, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA
Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-6818-9

Impreso en México
Printed in Mexico

PROEMIO

Un científico supuestamente debe tener –y de primera mano— conocimientos completos y profundos sobre ciertos temas; por eso normalmente se espera de él que no escriba nada sobre un tema a menos que lo domine como un maestro. Esta reserva se considera una cuestión de "nobleza obliga". Para los fines presentes, deseo renunciar a la nobleza, si es que existe, y quedar liberado de la obligación que impone.

ERWIN SCHRÖDINGER, *What is Life?*

Precisamente para compartir el placer que brinda el conocimiento científico y, al mismo tiempo, contribuir a devolver a la ciencia su sitio dentro del gran espacio de la cultura, corrí el riesgo de renunciar a lo que Schrödinger, en el epígrafe antes mencionado, llama la "nobleza". La ayuda amistosa de muchos colegas hizo posible esta aventura que, para mí, será siempre a la vez regocijante y peligrosa.

C. A.

INTRODUCCIÓN
¿LA CIENCIA FUERA DE LA CONCIENCIA?

COMO NINGÚN OTRO, el siglo que termina se ha visto dominado, transtornado, acelerado y transformado por la ciencia.

Al mismo tiempo, como nunca antes, la ciencia se ha alejado de la cultura y, por lo mismo, de la conducción de los asuntos del mundo. En este fin de siglo tan lleno de tinieblas, la fuente del conocimiento, la que puede iluminar el futuro, se ha aislado y confinado, como si unos cuantos la hubiesen confiscado.

Y en verdad es extraña esta sociedad que utiliza ávidamente los productos de la ciencia, al grado de asfixiarse en la aceleración que ella misma se impone, y que simultáneamente se niega a conocer a profundidad la ciencia y, por consiguiente, no puede dominar sus recursos. Tal vez este alejamiento y esta gran distancia sean los responsables del sentimiento de vértigo, o incluso de miedo, que inunda a las sociedades que han dominado el mundo desde hace siglos.

Y sin embargo, no hay tema más maravilloso que la ciencia de fines del siglo XX. Nunca antes en la historia del hombre había alcanzado esa riqueza, esa variedad, esa calidad. Nunca había abierto semejantes perspectivas para la comprensión del mundo que nos rodea. Al mismo tiempo, se ha refinado, se ha despojado de las certidumbres y dogmatismos que con tanta frecuencia la encerraron en moldes demasiado estrechos. Como dice François Jacob, "hace ya un buen tiempo que los científicos renunciaron a la idea de una verdad última e intangible, imagen exacta de una realidad que espera ser revelada a la vuelta de la esquina".

Así, el formidable mensaje de la ciencia de fines del siglo XX acerca del hombre y su futuro parece ser: si el hombre es capaz de progresar tan rápidamente en la comprensión de las leyes de la Naturaleza, si es capaz de crear ùn mundo material e intelectual que rivaliza en complejidad con el que produce la naturaleza misma, ¿por qué no ha de ser capaz de controlar su destino?

Es cierto que, a lo largo de ese proceso, este hombre emprendedor que multiplica sus iniciativas de manera un tanto anárquica ha puesto en serio peligro a la naturaleza misma: nuclear, ecológico, demográfico... ¿pero es esto motivo de desesperanza, fatalismo o nostalgia del

pasado? Si es capaz de identificar los peligros y de advertir sobre ellos, el hombre debería también ser capaz de conjurarlos.

Por ser un producto de la evolución biológica, el hombre, por naturaleza, se orienta de forma congénita hacia su futuro. Debe enfrentarlo con determinación, pero también recurriendo a todas las ventajas que le brinda su propia historia, es decir, en primer término y ante todo, al conocimiento.

Cabe señalar que el distanciamiento de la conciencia colectiva respecto de la ciencia se ha acentuado particularmente en el Viejo Mundo.

¿Es una casualidad que a nuestro continente le cueste más trabajo seguir el ritmo desenfrenado de cambios tecnológicos que tampoco impulsa ya, por haberse rezagado poco a poco en la batalla económica de la materia gris?

Y sin embargo, al contrario de lo que piensa la mayoría de la gente, la ciencia europea no ha estado ausente en las grandes conquistas actuales del conocimiento. Tras la sacudida que representó la segunda Guerra Mundial, y que contribuyó al ascenso de Estados Unidos, la ciencia europea se ha ido recuperando poco a poco, como lo demuestra el reparto de las distinciones internacionales. Pero esta resurrección casi no se ha reflejado en la tecnología ni, por consiguiente, en la economía. Las autoridades europeas, y en particular el gobierno francés, han gastado sumas estratosféricas en la investigación sin lograr que las recaídas económicas estén a la altura de su apuesta y de sus esperanzas. ¿De quién es la culpa?

La razón "cartesiana", la que más cultivamos y veneramos, nos inclinaría a buscar la respuesta entre los científicos: "Aunque inundados de dinero, estos depositarios de las esperanzas de todo un continente no estuvieron a la altura de las circunstancias"; por eso escuchamos por todas partes la idea de que la ciencia y los progresos tecnológicos ahora se realizan en América, y que invertir en Europa es tan dispendioso como inútil.

Esta visión, bastante extendida entre las esferas del poder, es absolutamente inexacta. Incluso es un contrasentido que puede llevarnos a la decadencia. Los responsables de la postración intelectual y tecnológica que vive Europa no son los científicos.

En un mundo que cambia rápidamente, donde la materia gris y la imaginación se vuelven esenciales para la batalla económica, Francia y Europa se han estancado.

Nuestro Viejo Mundo, incapaz de seguir el ritmo frenético que le imponen las innovaciones tecnológicas y la globalización de los intercambios, lento para reaccionar e incapaz de adaptarse con rapidez a

situaciones que no dejan de cambiar, vive con el recuerdo de sus glorias pasadas y ya marchitas. ¡Y qué golpe tan duro perder la batalla de la inteligencia para quienes, todavía ayer, clamaban con orgullo: "No tenemos petróleo, pero tenemos ideas"!

En nuestra opinión, este progresivo declive tecnológico (y por lo tanto económico) de Europa es ante todo de origen cultural, y es consecuencia del modo de formación y selección de nuestras élites, y del lugar que ocupa la ciencia en nuestra educación.

En una serie de conferencias dictadas en el Collège de France, Alain Peyrefite[1] mostró cabalmente que todos los "milagros económicos" que se han producido en la historia mundial han sido resultado de una cultura y una moral. Ninguno estaba escrito en las Tablas de la Ley, como tampoco lo estaban sus respectivas decadencias.

Nuestras élites, o bien no han tenido enseñanza científica, o la que han recibido es inadecuada y obsoleta. Al carecer de formación en los campos de la imaginación creadora y la flexibilidad intelectual, son incapaces de aceptar la innovación precisamente por su carácter imprevisto, promotor del desorden. Ignorantes de lo que son la observación o la experiencia concreta, víctimas de una educación dogmática y abstracta, permanecen sujetas por un corsé intelectual que les impide anticipar los cambios. Seleccionadas muy jóvenes en cuanto a sus capacidades para aprender y protegidas de los cuestionamientos por un sistema de castas, no logran superar lo que la escuela les ha imbuido.

Como el sistema de formación de las élites orienta toda la pirámide educativa, el resto del país adolece de las mismas fallas. En ese contexto, es difícil construir un tejido intelectual que permita la expansión de las innovaciones tecnológicas y científicas. Europa no va a la zaga de América en lo referente a los "descubrimientos", a las ideas iniciales, pero se ve totalmente rebasada y opacada en lo que respecta a sus desarrollos científicos. En los hechos, esa ciencia que nació en Europa florece en Estados Unidos, y las patentes francesas vuelven millonaria a la industria japonesa. En castigo por su incapacidad para desarrollar una cultura científica adaptada a la "dictadura de los hechos", y por tanto a la aceptación de la novedad, estamos condenados al parecer, a vivir el siglo XXI como una era de decadencia.

Por eso queremos insistir aquí deliberadamente en que la causa profunda de nuestras dificultades es ante todo de orden cultural, es decir, intelectual y moral; pero que las fatalidades no existen, que nuestro futuro no está escrito en ningún sitio y que nunca es demasiado tarde para reaccionar y tratar de edificar una nueva cultura.

[1] *Du miracle en Économie,* París, Odile Jacob, 1995.

Pero, ¿qué es lo que hace evolucionar al mundo? Ante la permanencia de la condición absurda del hombre —ser aislado en un planeta excepcional que gira alrededor de una estrella cualquiera perdida en una de las miles de millones de galaxias del cosmos; ser lleno de angustias ante la vida, ante la muerte, con su irrefrenable necesidad de amor y de odio, y su inteligencia individual que paradójicamente debe enfrentarse tan a menudo a su estupidez colectiva—, está el movimiento.

Este movimiento designa el aumento de los conocimientos, el mejoramiento de las condiciones de vida, la lucha contra la enfermedad y la injusticia, la liberación del trabajo pesado, el incremento de las posibilidades de comunicación y, sobre todo, la dominación de los miedos ancestrales. Se halla en el origen de estos progresos y de muchos otros, un paso adelante en el conocimiento, es decir, de la ciencia.

No hay liberación posible del hombre, ni posibilidad de atenuar el carácter absurdo de su condición o sus angustias sin la ciencia. Como dice el gran historiador inglés Toynbee,[2] la ciencia es lo que hace "progresar" al mundo. Al decir esto, no estoy cayendo en algún tipo de cientificismo triunfante. Al contrario, ya que debido a una aparente paradoja, la ciencia se ha vuelto objeto de una verdadera segregación. Se ha convertido cada vez más en una esfera intelectual reservada a unos cuantos. Los científicos se han replegado en sus respectivas disciplinas, negándose con demasiada frecuencia a hacer el esfuerzo necesario para ayudar a construir una cultura científica más amplia. Pero el alejamiento y el aislamiento de la ciencia con respecto al resto de la cultura es ante todo una consecuencia directa de nuestro método de enseñanza, que considera básicamente a la ciencia como un instrumento de selección y no un elemento de la cultura. Y, ¿cómo podría alguien amar el instrumento destinado a eliminarlo, el látigo que servirá para castigarlo? Al ser la ciencia un instrumento de selección, su enseñanza se organiza en función de los futuros especialistas y no tiene la vocación de dirigirse a todas las personas.

En forma simétrica, los que han sido seleccionados por la ciencia tienden a proteger el sistema que los eligió y a confiscar el saber al que deben tanto su ascenso social como su poder, basado en este acaparamiento.

Este doble mecanismo, pese a algunos esfuerzos aislados, ha llevado al aislamiento de la cultura científica, que en resumidas cuentas ha recorrido el camino inverso a la música: en vez de convertirse en un bien común, ¡está en camino de considerarse un privilegio!

[2] *La grande aventure de l'Humanité,* París, Payot, 1994.

La presente obra se propone sustentar la opinión contraria a esa tendencia. Aspira a compartir el conocimiento entre el mayor número posible de personas, pero sosteniendo que este saber sea algo actual, vivo, cambiante, rico, jamás estático. Un saber que ofrezca algunas respuestas y despierte muchas preguntas.

Por esta razón el núcleo de este libro lo constituye el recuento de los grandes avances de la ciencia a fines del siglo XX. Se trata de un recuento accesible, que insiste tanto en la importancia de las conquistas como en el proceso que llevó a lograrlas. Por ello nos empeñamos en mostrar que la ciencia ocupa un sitio central, pero desde luego no exclusivo, en cualquier cultura.

Esperamos compartir nuestro deslumbramiento frente a la extraordinaria aventura humana e intelectual que han vivido la ciencia y la tecnología contemporáneas. Al mismo tiempo, nos gustaría dejar en claro que esos avances no modifican únicamente nuestros conocimientos sino, sobre todo, nuestras formas de pensar. Esto nos llevará a poner en tela de juicio muchas de ideas y sobre todo las difundidas.

Antes de continuar es necesario hacer algunas precisiones sobre nuestro vocabulario para evitar cualquier confusión. Por ejemplo, cuando hablemos del "pensamiento platónico", nos referiremos más bien a cierta tendencia a intelectualizar, a una línea de pensamiento que ignora la experiencia y privilegia lo mental sobre lo real, que a una exégesis exacta del autor del *Timeo* o *La República*. Cuando llegue el momento, nos esforzaremos en describir y "calificar" la actitud que nos interesa desarrollar, pues el título de la obra exige esta aclaración.

Los progresos de la ciencia más moderna no pueden explicarse sin que los situemos en un contexto más general, es decir, sin colocarlos en una perspectiva histórica.

Hemos decidido iniciar este acercamiento partiendo del siglo XIX. No porque consideremos que antes de ese siglo no hubiera ciencia, sino porque nos pareció una referencia cómoda y bien definida. A partir de entonces la ciencia empieza a encontrar una formalización compacta y sus diversas disciplinas adquieren una clara autonomía. Pero también porque la ciencia de ese siglo impregna aún nuestros programas de enseñanza y constituye la trama de la formación científica de nuestras élites, conviene recordar algunas de las peripecias de su historia y sus contenidos. En el capítulo I haremos un rápido recorrido por este periodo.

En los inicios del siglo XX se produce en la física una profunda revolución, marcada por el nacimiento, en un espacio de tiempo reducido, de dos teorías de gran importancia: la mecánica cuántica y

la relatividad. Ambas nos han sido presentadas casi siempre como algo compacto y racional, y esta axiomatización sólo ha servido para reforzar una visión que por desgracia comparten muchas personas: la visión deformada de una ciencia dogmática y acabada, difícil de comprender; una ciencia que busca, como conclusión final y como meta, lograr el rigor del desarrollo matemático, que es a la vez un lenguaje y un modo de pensamiento esencialmente deductivo. Nos parecía absolutamente necesario disipar esa ilusión recordando las condiciones reales de los avances históricos.

En esa época, los principios del siglo XX, las demás ciencias de la naturaleza —química, geología, biología, etc.— se encuentran en un estado prerrevolucionario. En resumen, están en proceso de forjarse los elementos de sus revoluciones respectivas, sin que existiera una plena conciencia de ello. Como la historia se lee a la inversa, hemos intentado traducir este contraste entre una física matemática que "se descubre" y las ciencias naturales, que "se investigan" pues ésa es la visión que se ha propagado hasta nuestros días.

Desde el punto de vista de los contenidos científicos mismos, ese periodo nos parece en la actualidad una transición, y respetaremos esa visión en el capítulo dedicado a este tema, el II.

Los capítulos siguientes forman el núcleo de la presente obra, dedicada a la ciencia del siglo XX. Los abordaremos en un orden que no es ni indistinto ni sistemático, pero que ilustra lo que consideramos un nueva actitud:

• Empezaremos con la computadora, que es a la vez la herramienta, el emblema y el componente universal de la ciencia moderna. Sin ella no existirían infinidad de adelantos. Al mismo tiempo, no constituye en sí misma un descubrimiento científico, sino un objeto tecnológico. Esta situación ilustra muy bien la naturaleza de la ciencia actual, en la que ciencia pura y tecnología están íntimamente ligadas.

• Seguiremos con la biología molecular, pues el desarrollo de esta disciplina señala en nuestra opinión la mayor discontinuidad epistemológica de ese periodo. Con ella, la biología se sitúa a la vanguardia del progreso científico. Rompe de golpe con la absurda clasificación de las ciencias propuesta por Auguste Comte y se convierte en una ciencia mayor, en toda la extensión de la palabra, implicando procedimientos y métodos totalmente originales.

• La teoría de la información ocupará el capítulo V. Aunque menos popular y conocida, constituye una trama multidisciplinaria cuyos efectos e influencias están lejos de disminuir, como se verá a lo largo de esta obra. Es una de las conquistas más originales de la ciencia de nuestro siglo y domina el "mundo de la comunicación" en el que esta-

mos inmersos. No hemos querido tratar ese tema junto con el de la computadora, pues sus mensajes son muy diferentes pese a que la semántica, descuidadamente ha intentado mezclarlos.

• El capítulo VI se dedica a los desarrollos del mundo cuántico. Esbozados a principios de siglo, sólo alcanzarán su plenitud al término de éste, y conllevarán descubrimientos esenciales para nuestro mundo que no pueden reducirse, ni siquera por razones emblemáticas, al trío "mágico" transistor / láser / energía nuclear...

• Quisimos incluir después un capítulo sobre la química, ya que precisamente a fines del siglo XX parece haber tenido un boom y adquirir un vuelo que difícilmente perderá altura. Esta ciencia discreta y despreciada está en proceso de invadir todas las demás, tanto las de la naturaleza como las del artefacto.

• En el capítulo VIII abordaremos el terreno del sueño racional, es decir, la extraordinaria aventura de la astrofísica que nos conducirá a los confines del Universo y a los primerísimos instantes del nacimiento de los mundos.

• Vendrá después un capítulo sobre las ciencias de la Tierra y de los planetas, disciplina que se renovó por completo en la posguerra y por la que intenté refrenar en esta obra mi entusiasmo "profesional".

• En el capítulo X abordaremos una nueva "galaxia intelectual", una nueva manera de pensar, mediante la exploración de lo "no lineal", ese mundo donde los efectos ya no son proporcionales a las causas, donde el determinismo engendra lo indeterminado, donde el orden organiza al caos. Un mundo fascinante que apenas estamos empezando a explorar.

• Por último, para concluir este "paseo por las ciencias", abordaremos el tema quizá más importante para el ser humano: el del cerebro. ¿Cómo funciona esta máquina neuronal que nos "distingue" de los animales? ¿Cómo se elabora el pensamiento abstracto que nos caracteriza? La ciencia moderna sondea estos misterios, que se hallan en los confines del alma o de la conciencia.

En todas estas exploraciones un tanto precipitadas, hemos tratado de mencionar los puntos más destacados, los descubrimientos epónimos, pero, ante todo, nos esforzamos por resucitar el espíritu mismo del proceder científico, mostrando en ocasiones nuestro deslumbramiento, pero sin olvidar el carácter esencialmente inacabado de la ciencia.

De este recorrido por los paisajes de la ciencia moderna deberá surgir una nueva visión, capaz de modificar por completo grandes segmentos de nuestra educación y nuestra cultura. La ciencia deductiva, austera, rígida, automática —la que afirma que "a partir del invento de

la rueda, se hicieron inevitables las tiendas departamentales"—, debe dar paso a una ciencia variada, imprevista, flexible, incluyente. Una ciencia sin arquetipos, de la que nadie esté excluido. Una ciencia que le dé la espalda a Platón, Descartes o Auguste Comte, "ministros" de una falsa religión y constructores de mundos terminados.

Discutiremos estos temas en el capítulo XI, tratando de mostrar al mismo tiempo algunas de las enseñanzas generales que nos brindan.

Con un tono más libre y personal, hemos querido sacar algunas conclusiones prácticas a manera de epílogo. El empleo de la primera persona del singular indica que este codicilo es de naturaleza distinta. Lo escribí con la idea de provocar reacciones saludables que al menos vuelvan parcialmente caducos los temores que expreso en él.

I. QUERIDO SIGLO XIX...

El siglo XIX es a la vez una marca y una referencia. Es el punto de partida que permite calibrar los progresos posteriores, la vara que sirve para medir la calidad de éstos.

El siglo bello

Este siglo, que se inicia con el ruido apenas acallado de la Revolución francesa y termina con el triunfo de la Tercera República, parece ser un periodo mítico para la historia intelectual del "Viejo Mundo". Muchos de los conflictos políticos actuales tienen su origen en la historia de las mentalidades de este periodo; por ello, nos concentraremos en sus aspectos intelectuales y culturales.

Para los novelistas, el siglo XIX sigue siendo un siglo "mágico", sin comparación con ningún otro, que incluso opaca al XX, sin que nadie se aventure a explicar por qué. La pintura y la música se cultivaron en él con pasión, pese a que no hubo ningún Miguel Ángel, Watteau, Bach o Amadeus que tuviera la fortuna de ilustrarlo.

También para la ciencia —aunque esto a veces se olvide sin razón— se trata de un periodo azul, el periodo en el que puede decirse que nace la ciencia moderna en una de sus formas más acabadas: la física.

En el siglo XIX, los progresos científicos se harán en nombre del racionalismo. Será la primera vez en la historia del mundo que la ciencia tuvo el valor de liberarse por completo de prohibiciones, tabúes e interferencias políticas, la primera vez que proclame su fuerza, el papel que debe cumplir en la sociedad. Será escuchada tanto por la reina Victoria o los káiser prusianos o austriacos, como por los emperadores franceses. Los científicos, además, nunca fueron tan estimados, considerados y respetados, recibidos e incluso escuchados por los príncipes que nos gobiernan.

Pero tal vez lo más sorprendente sea la influencia que ejercerán las ideas científicas nacidas en ese siglo sobre el siguiente, fijando al mismo tiempo una visión hecha de imágenes fuertes, pero deformadas y superadas. En este sentido es indispensable comprender lo que fue el siglo XIX si queremos apreciar el trecho que se avanzó en el siglo XX, y percatarnos de la extraordinaria lente deformante con que nos hace ver todavía nuestra concepción de la ciencia.

Por constituir la cima de esa ciencia del siglo XIX, empezaremos recordando a la física. Se trata de la física a la que suele llamarse "clásica", que se encarga de explicar las leyes de la naturaleza en su aspecto macroscópico, es decir, tal como las perciben nuestros sentidos. Esta física comprende cuatro grandes rubros: la mecánica, que se ocupa del movimiento de los cuerpos; la termodinámica, que estudia las relaciones entre el calor y la energía; la óptica, cuyo objeto de estudio es el comportamiento de la luz; y por último, la electricidad, más misteriosa y que, no obstante, es el fundamento de la civilización moderna. Todas estas disciplinas de la física fueron comprendidas y quedaron formalizadas a fines del siglo XIX. Son las que se enseñan de manera prioritaria hasta nuestros días, tanto en la escuela como en la universidad.

MECÁNICA

Utilizaremos el término *mecánica* no en la acepción común del término, que tiene que ver con engranajes y motores, sino como la ciencia teórica que apasionaba a los griegos y que se ocupa del movimiento de los cuerpos.

El gran descubrimiento de la mecánica fue hecho por Isaac Newton a fines del siglo XVII. Se produjo en circunstancias extrañas, en 1666. Newton, ya titulado en Cambridge, se había recluido entonces en su aldea de Woolsthorpe para escapar a una temible epidemia de peste. En esta soledad completa, el joven sabio de apenas 24 años comprende lo que Galileo había entrevisto y Aristóteles no había captado, es decir, que la aplicación de una fuerza sobre un objeto no hace que se conserve su movimiento, sino que lo modifica.[1]

Newton postula que la fuerza provoca la aceleración del cuerpo sobre el que se aplica de acuerdo con una ley de proporcionalidad. El factor de proporcionalidad es la masa.

Este descubrimiento, tan contrario al sentido común como a la física de Aristóteles, ha sido considerado por muchos como el más importante de la física.[2]

[1] Aristóteles pensaba que, dado que un cuerpo en reposo se pone en movimiento mediante la aplicación de una fuerza, es ésta la que produce el movimiento. Tras una serie de experimentos sobre la caída de los cuerpos pesados, efectuados en la torre inclinada de Pisa, Galileo comprendió que una fuerza aplicada a un cuerpo tiende a acelerarlo. Entrevió el principio de inercia, es decir, que un cuerpo en movimiento al que no se le aplica ninguna fuerza sigue un movimiento rectilíneo uniforme. Desgraciadamente, no sacó todo el provecho posible de esta idea.

[2] Véase Emilio Segré, *Les Physiciens classiques et leurs découvertes*, París, Fayard, 1987; Jacques Blamont, *Le Chiffre et le Songe*, Odile Jacob, 1993.

Pero Newton va más lejos. Se cuenta que al ver caer una manzana de un árbol comprende que si la manzana cae es porque la Tierra la atrae.[3] A partir de ahí postula que, entre las fuerzas que existen en el Universo, hay una que atrae a dos cuerpos cualesquiera. La ley que la describe depende de la masa de los dos cuerpos y varía en forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Es una fuerza muy curiosa que actúa a distancia, sin que se perciba cómo lo hace. ¿Cómo se produce dicha atracción? ¿Por medio de qué? El propio Newton se muestra perplejo.

No es sino años más tarde, después de demostrar matemáticamente las leyes que rigen el movimiento de los planetas alrededor del Sol, formuladas por Johannes Kepler,[4] cuando Newton acepta por fin la validez de su propia ley.

La acción a distancia es un descubrimiento fundamental para la física. Tal vez algunos pensaron que después de Newton ya no quedaba mucho por descubrir en el campo de la mecánica, pero no era así: Newton había puesto los cimientos, pero aún faltaba construir el edificio.

Este desarrollo se realizó a lo largo de todo el siglo XIX. Sus artífices son Laplace, Lagrange y Hamilton. Newton había sido el creador; ellos serán los constructores de la mecánica. Durante este periodo se introdujeron los conceptos de energía, trabajo, momento cinético, momento angular: en suma, los conceptos básicos de la mecánica tal como se enseña en la actualidad. Pero lo más importante es que esta disciplina se convertirá poco a poco en un cuerpo de doctrina sumamente lógico, fundado en axiomas y en principios matemáticos. Su aspecto experimental prácticamente quedará anulado. Sólo la astronomía seguirá siendo una referencia obligada, y los estudiosos de su mecánica aumentarán nuestros conocimientos de la relojería planetaria, y en particular de las irregularidades que Newton no había percibido.

La ciencia mecánica se manifiesta así como un cuerpo de conocimientos cuyo dominio permite hacer cualquier deducción y plantear cualquier posibilidad. Una vez segura de sí misma, esta disciplina

[3] Después de sus experiencias en la torre de Pisa, Galileo lo había comprendido.

[4] Son tres las leyes formuladas por el astrónomo alemán Johannes Kepler a principios del siglo XVII, a partir de observaciones astronómicas minuciosas, y pueden enunciarse como sigue en lenguaje simple:

1ª: Los planetas giran alrededor del Sol siguiendo órbitas elípticas, en uno de cuyos dos focos está el Sol;

2ª: El movimiento de los planetas sobre sus órbitas no es uniforme: se aceleran cuando se acercan al Sol y disminuyen su velocidad al alejarse de él;

3ª: Cuanto más alejados del Sol están los planetas, más lentamente giran en torno a él.

racional,[5] monumento de lógica y de rigor elegante que se sitúa en la frontera de las matemáticas y de la física, servirá como referencia para todos los desarrollos posteriores de la física. Todo el mundo admirará el monumento acabado, olvidando que es sólo la culminación de 20 siglos de esfuerzos intelectuales por caminos tortuosos.

Termodinámica

Como su nombre lo indica, la termodinámica se ocupa de las relaciones que existen entre la temperatura, el calor y el movimiento (en otras palabras, de la mecánica). ¿Cómo producir trabajo o poner en marcha una fuerza con ayuda del calor?

Hoy en día la termodinámica se nos presenta como una disciplina lógica, abstracta, basada por completo en dos principios: el de la equivalencia entre calor y trabajo, y el que postula que en una máquina térmica el rendimiento es siempre inferior a la unidad.

A partir de esos principios simples y de una aplicación rigurosa de la teoría matemática de las ecuaciones con derivadas parciales, se construye un todo coherente y riguroso, ejemplo perfecto de la ciencia deductiva.

La realidad del siglo XIX, es decir de la época en que se desarrolló la termodinámica, es completamente distinta. Recordémosla brevemente.

El calor preocupaba a los físicos desde hacía un siglo. Había dos teorías opuestas acerca de su naturaleza. Para unos, se trataba de una sustancia sin masa pero que fluía como un líquido, el calórico. (Tal era, por ejemplo, el punto de vista que utilizó Joseph Fourier, futuro prefecto de Isère en tiempos de Napoleón, para desarrollar su teoría de la propagación del calor.) Para otros, como Thomas Young, se trataba de vibraciones que recorrían a las sustancias. En ambos casos, se planteaban preguntas sobre las relaciones entre calor y temperatura. Ya se sabía medir la temperatura con ayuda del termómetro, pero ¿cómo medir el calor?

La misma confusión existía respecto a los conceptos de trabajo y energía considerados desde el punto de vista mecánico. Una vez más, Thomas Young la disipó al postular que la energía mecánica podía expresarse como el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad (había olvidado un factor de 1/2). Con ayuda de las ecuaciones

[5] Cuando Napoléon le preguntó a Laplace qué papel desempeñaba Dios en todo eso, el científico respondió con altivez: "Majestad, esa hipótesis no me hace falta".

de Newton se pudo mostrar que la energía era comparable al producto de una fuerza por un desplazamiento, es decir, al trabajo.

Las relaciones entre calor y trabajo seguían siendo oscuras, pero ya se sospechaba algo: ¿acaso el conde de Rumford, aventurero, sabio y espía del siglo XVIII, no había demostrado, perforando fustes de cañones con un taladro de mano, que el trabajo se transformaba en calor?[6]

Todo esto se conjugaría a principios del siglo XIX para fundar la Termodinámica.

Sadi Carnot,[7] hijo de un famoso general de la Revolución, rumiando la derrota frente a los ingleses llegó a la conclusión de que la clave del poderío militar y económico residía en el control de la energía, simbolizado en este caso por la máquina de vapor. Paradójicamente su trabajo, que data de 1824, tratará sobre el segundo principio de la termodinámica: la imposibilidad del movimiento perpetuo. Deduce el primer principio pero no publica nada acerca de él. Su estudio, sacado del olvido por Calpeyron unos años más tarde, desata una verdadera revolución. Mayer, Calpeyron, Thomson (el futuro Lord Kelvin), Joule y Helmholtz establecerán (tras varios titubeos) el primer principio de la termodinámica: la equivalencia del trabajo y del calor, y la conservación de su suma.

La verdadera síntesis de estos esfuerzos será obra del alemán Clausius, quien en 1850 explicita el primer principio y reformula el segundo, introduciendo una extraña magnitud a la que llama entropía y que corresponde al calor por unidad de temperatura. Asimismo, esclarece conceptos esenciales como los de equilibrio y transformación reversible, y considera a ésta como una sucesión de estados de equilibrio en la que en cada momento se puede dar marcha atrás sin problema. Este concepto de equilibrio, derivado de la mecánica, tendrá importantes repercusiones.[8]

[6] El calor es una magnitud física que por mucho tiempo fue un misterio. Se sabía que "fluía" de lo caliente hacia lo frío; se sabía que estaba ligado a la temperatura. De hecho, el calor es una energía que se relaciona con la agitación de los átomos, ligada también a la temperatura. El trabajo se define en mecánica como el producto de la fuerza por el desplazamiento. También es una energía, pero que se manifiesta en la escala sensible, "macroscópica", como dicen los físicos. Simplificando, podemos decir que el calor es el trabajo que realizan los átomos a escala microcópica. El primer principio de la termodinámica afirma que, en términos de trabajo, la transformación de lo macroscópico en microscópico es posible en ambos sentidos.

[7] Sadi Carnot (1796-1832) es el hijo de Lazare Carnot y el tío del futuro presidente de la República Sadi Carnot (1837-1874).

[8] Cuando los ingenieros Cournot y Walras intenten transformar la concepción filosófica de la economía de Adam Smith en un enfoque cuantitativo, se inspirarán en la termodinámica para construir un modelo económico ideal, planteando los dos principios básicos siguientes:

1) El consumidor trata de maximizar su satisfacción minimizando sus gastos.

2) El productor trata de maximizar sus ganancias.

En los años posteriores a la síntesis de Clausius se realizaron grandes esfuerzos para multiplicar los experimentos, sobre todo con gases, con objeto de completar, poner a prueba o enriquecer la teoría, pero el planteamiento básico no se modificará.

Física estadística

En la segunda mitad del siglo XIX esta termodinámica tan abstracta, tan general en sus principios y tan elegante en su rigor, será transformada por un enfoque completamente nuevo y mucho más concreto, gracias a la utilización de la estadística.

Hacia fines de siglo, adoptando resueltamente la idea de que la materia está formada por partículas[9] (átomos y moléculas), Maxwell, Boltzmann y Gibbs abordarán sucesivamente los sistemas físicos con la mirada nueva del estadístico. Según ellos, un sistema físico está formado por miles de millones de partículas[10] con comportamientos casi aleatorios, que vibran, se desplazan, chocan entre sí y golpean las paredes de los recipientes; las propiedades del sistema se reducen a los valores promedio de esos comportamientos individuales, múltiples y variados. La presión de un gas no es, pues, más que la suma de las fuerzas que ejercen las partículas sobre las paredes de un recipiente. La temperatura mide la agitación de los átomos y las moléculas. La entropía, un concepto abstracto hasta entonces, es la medida del desorden de un sistema. El segundo principio de la termodinámica, que postula la degradación de la energía, se interpreta diciendo que el desorden de un sistema aislado tiende por naturaleza a aumentar. Con este enfoque se establece el vínculo entre el comportamiento microscópico y la observación macroscópica, pero, sobre todo, se introduce la idea de que el comportamiento de la materia no es más que la consecuencia de los comportamientos desordenados de una gran cantidad de partículas; el resultado de leyes estadísticas, por lo que el cálculo de probabilidades se vuelve una herramienta fundamental para describir las leyes de la naturaleza. Se trataba de una proposición revolucionaria

Recurrirán también al concepto de equilibrio y, a partir de ahí, realizarán sus cálculos basándose exactamente en los de la Termodinámica.

[9] Idea que todavía entonces rechazaban en la época la mayoría de los químicos.

[10] Un gramo de hidrógeno o 12 gramos de carbono, es decir, su masa atómica, representan 6 023 10^{23} átomos. A este número se le llama número de Avogadro, por el nombre del químico italiano que, a principios de siglo, lo determinó. Recordemos la notación en 10^n que se utilizará a lo largo de esta obra: 10^n representa la cifra 1 seguida de n ceros; mil se escribe 10^3, un millón 10^6; y a la inversa, $10^{-1} = 0.1$; $10^{-2} = 0.01$, etcétera.

para la época, pues ¿cómo podía hablarse de probabilidades en un mundo que se consideraba racionalista y determinista?

Este enfoque hace muy comprensibles los conceptos abstractos de la termodinámica y permite establecer un lazo concreto y sólido con la mecánica. Al principio no se comprenderá la importancia del paso que acaba de darse, y ante la incomprensión de sus colegas alemanes, Boltzmann, desesperado, se suicida. Sin embargo, su planteamiento fue sin duda uno de los más fructíferos y originales que se han producido jamás en la Física.[11]

Óptica

En las postrimerías del siglo XIX, la óptica es ya una disciplina vieja. Se sabe que la luz se propaga en línea recta en forma de rayos luminosos. Éstos se refractan o se reflejan al pasar del aire al vidrio, tal como lo había demostrado Descartes, y con ayuda de reglas geométricas simples se pueden trazar los trayectos de los rayos luminosos al pasar a través de una pequeña lente de vidrio o reflejarse sobre un espejo plano, esférico o parabólico. Con base en estos principios se fabricaban desde tiempo atrás instrumentos de óptica.

Sin embargo, desde hacía un siglo se enfrentaban dos concepciones sobre la naturaleza de la luz: la de Huygens (1629-1695) y la de Newton (1642-1727).[12] Para Huygens la luz está formada por ondas que se propagan en línea recta. Para Newton se trata de partículas de colores variados que se desplazan también en línea recta, y cuya mezcla produce la luz blanca.[13]

De este modo había coincidencias sobre los principios de lo que se conoce como óptica geométrica, pero desacuerdos en cuanto a la naturaleza de los rayos luminosos, es decir, a la luz misma.

[11] De hecho, *a posteriori* se entenderá que tenía en germen los principios cuánticos, tanto en lo relativo al enfoque probabilista como al de los estados microscópicos discretos.

[12] Huygens y Newton eran casi contemporáneos, pero la fama abrumadora del segundo —la "Montaña mágica", como lo llama Emilio Segré— eclipsó injustamente la reputación del primero. Sin embargo, Huygens tuvo un destino excepcional. Su padre era amigo epistolar de Galileo. Él mismo, desde su juventud, frecuenta a Rembrandt, Spinoza y Descartes, y más tarde a Pascal. Por ello, a menudo se le presenta como el hombre de transición entre Galileo y Newton. La obra de Huygens es sumamente original. Puede decirse que tras haber descubierto los anillos de Saturno y algunos teoremas matemáticos, fue el hombre de los movimientos vibratorios y las ondas, el precursor de lo que constituirá un gran capítulo de la física. Tras haberse interesado en los péndulos y entendido muchas de sus sutilezas, se concentra en la óptica.

[13] De hecho, lleva a cabo una obra experimental de primerísimo nivel. Tras descomponer la luz con un prisma, deja pasar esos rayos de colores por otro prisma invertido y muestra que la luz se ha vuelto blanca de nuevo.

Esta cuestión quedará "resuelta" por primera vez en el siglo XIX con los trabajos sucesivos e independientes del inglés Young (1773-1829) y del francés Fresnel (1788-1827). Contra la opinión del grupo de Laplace, que defendía la teoría corpuscular de Newton, ambos admiten que la luz es de naturaleza ondulatoria, y que cada longitud de onda corresponde a un color. Como la mezcla de los diversos colores produce el "color blanco", significa que está formado por todo un espectro de longitudes de ondas. La ausencia de todas las ondas se traduce en oscuridad. Su teoría se basa en experimentos precisos de interferencias y difracción de la luz.[14]

Pronto quedará completa gracias a las observaciones sobre la polarización de la luz, las que permitirán establecer que la luz vibra en un plano perpendicular a la dirección de su propagación.[15] Esta dirección de propagación es la misma de los rayos luminosos, los cuales no se ponen en duda.

Así, después de Young, Fresnel y también Arago, la mayoría de los físicos se suscribirán por completo a la interpretación de Huygens. Los sabios del siglo XIX aceptan la idea de que la luz está formada por ondas. Para describirla utilizan dos técnicas complementarias: a veces la de los rayos luminosos, y en otras ocasiones la de las ondas (una vez más, siguiendo los métodos de Huygens). Paralelamente a estos esfuerzos, Fraunhofer estudia en Alemania los colores y pone los cimientos del estudio de los espectros ópticos emitidos por el Sol o por una llama.

No obstante, aunque todo sonaba lógico, la gente se preguntaba acerca de la naturaleza de estas ondas o vibraciones luminosas. El problema se reducía a una simple pregunta: ¿qué es lo que vibra? La analogía con las ondas acústicas resultaba atractiva. Pero en el caso del sonido lo que vibra es el aire o el agua, y el sonido, contrariamente a la luz, no se transmite en el vacío.

[14] Cada color se caracteriza por la distancia recorrida en una vibración, lo que se conoce como longitud de onda. Las interferencias luminosas representan un fenómeno fascinante. Se practican dos agujeros o ranuras en un material opaco. Esas dos ranuras son dos fuentes de luz que emiten un cono luminoso, de modo que los dos conos tengan una parte común. Colocando entonces una pantalla perpendicular se comprueba que presenta franjas alternativamente claras y oscuras. Young interpreta las zonas claras como una suma de las vibraciones luminosas y las oscuras como su resta. Este fenómeno es uno de los más importantes de la física. La difracción es el fenómeno del halo luminoso que se forma alrededor de un agujero iluminado. Demuestra que la luz no está hecha de rayos simples que pasan por el agujero sin interactuar con él. Newton ya había señalado ese fenómeno, pero no había entendido toda su importancia.

[15] La polarización de la luz es la propiedad que se utiliza en los lentes oscuros para atenuar la intensidad de la luz solar. Cuando se empalman dos lentes oscuros "polaroid" se obtiene el negro.

Fue en esta época, hacia 1825, cuando se elaboró la idea de un medio ajeno: el *éter*, cuya vibración garantizaría la propagación de la luz. Pero este éter, evanescente y omnipresente hasta en el vacío, seguía siendo un misterio...

ELECTROMAGNETISMO

El tercer gran avance de las ciencias físicas en el siglo XIX fue la electricidad. Desde el sencillo experimento que consiste en frotar el pelambre de un gato contra una varita de vidrio, que se carga y empieza a atraer pedacitos de papel o granos de polvo (experimento conocído desde la Antigüedad) y, más tarde, con la distinción que hacía Charles Du Fay (1698-1739) sobre la existencia de dos tipos de electricidad, "vitrosa y resinosa",[16] los "experimentos con electricidad" habían fascinado a los primeros sabios del siglo XVIII. Su espectacularidad causaba asombro e intrigaba. Benjamin Franklin había descubierto en 1750 que los relámpagos eran en realidad descargas eléctricas. Queriendo repetir la experiencia del cometa de Benjamin Franklin para descargar la electricidad de una nube, Georg Wilhelm Richman fue fulminado en 1753 en Rusia, y ese drama espectacular bastó para convencer a la opinión pública de lo acertado de las ideas del famoso sabio estadunidense. Entre esa fascinación y el primer acercamiento serio, el descubrimiento de la ley de Coulomb,[17] hubo que esperar 50 años (1788) para que la electricidad dejara el terreno de la curiosidad anecdótica.

Podría pensarse que desde ese momento los progresos fueron rápidos, mas no fue así. Con el invento de la pila eléctrica por el italiano Volta en 1800 se da un paso decisivo. A partir de ese momento se contará con dos tipos de máquinas para producir la electricidad: las máquinas por frotamiento (llamadas electrostáticas) y las pilas químicas, más prácticas. Este descubrimiento abre un campo inmenso a los experimentadores y se aceleran los progresos. El electromagnetismo —la ciencia que estudia conjuntamente la electricidad y el magnetis-

[16] La electricidad vitrosa es la que se produce al frotar una varita de vidrio; la resinosa se produce frotando ámbar. La primera atrae los pedazos de papel, mientras que la segunda los rechaza.

[17] La ley de Coulomb dice que dos cargas eléctricas se rechazan si son del mismo signo o se atraen si son de signos contrarios, de acuerdo con una ley directamente proporcional al producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. Esta ley puede parecer una "adaptación" a la electricidad de la ley de la gravitación de Newton, sólo que la carga eléctrica sustituye a la masa.

mo— florecerá gracias a los trabajos sucesivos de tres gigantes: Ampère (1775-1836), Faraday (1791-1867) y Maxwell (1831-1879).

La señal que marca el inicio de esta época es el experimento inesperado que realiza el físico danés Oersted en 1820. En él demuestra que la corriente eléctrica, al pasar por un alambre electrificado, desvía la aguja de la brújula.[18] Era el indicio de que entre esos dos fenómenos de la física, hasta entonces considerados distintos, existía un lazo. Fue Ampère, matemático sagaz, quien en unos años elaboró la teoría acerca de ese vínculo e incluyó la electricidad y el magnetismo dentro de un mismo cuerpo de conceptos al que se denominará electromagnetismo. Este esfuerzo se extendería gracias a las aportaciones de Faraday y Maxwell.

Michael Faraday es uno de los más grandes físicos (y químicos) de todos los tiempos. Su método fue a la vez experimental y teórico en toda la extensión de la palabra; es decir, contribuyó a estructurar y dar coherencia a distintos hechos dispersos que había observado. Llevando más lejos las teorías de Ampère, demuestra el efecto mecánico que se ocasionan entre sí dos alambres electrificados por los que pasa corriente, y muestra cómo crear una corriente eléctrica a distancia por efecto del movimiento de un imán. Establece así el principio del motor eléctrico y del generador, base de la industria eléctrica y de su uso doméstico.

Pero su obra va mucho más lejos. Estableció la distinción racional entre materiales aislantes y conductores[19] y, a partir de ahí, postuló que la electricidad es producto de una suma de cargas discretas, lo que lo llevará a descubrir las leyes fundamentales de la electrólisis, es decir, de la manera en que se "propaga" la electricidad en ciertas soluciones acuosas. Fue también Faraday quien realizó las primeras descargas eléctricas en gases rarificados y mostró por primera vez la acción que ejerce un campo magnético sobre la luz, abriendo el camino a la magnífica síntesis de Maxwell y al experimento fundamental que realizará Pieter Zeeman 30 años más tarde.

Podríamos seguir nombrando los dominios de la física en los que Faraday hizo contribuciones decisivas. Pero más que en cualquiera de

[18] La electricidad ya estaba considerada como resultado del desplazamiento de cargas eléctricas, pero el magnetismo era mucho más misterioso. Se definía como la propiedad que tienen algunos cuerpos para atraer limadura de hierro. Puestos uno al lado del otro, los cuerpos imantados se atraen o se rechazan según su orientación. Se dice que los polos norte atraen a los polos sur pero rechazan a los otros polos norte y viceversa.

[19] Un conductor "conduce", es decir, deja pasar la corriente eléctrica. Un aislante "aísla", y en consecuencia, no deja pasar la corriente. El hierro o el cobre son conductores; el aluminio es aislante.

sus muchos progresos concretos, su legado más preciado reside en su metodología científica, pues al mismo tiempo que realiza experimentos, desarrolla un modelo para relacionarlos entre sí, vinculando constantemente la experimentación con la teoría. Y el que Faraday no utilice un aparato matemático sofisticado no significa que no sea un pensador teórico. Lo es, y de los mejores. Como ejemplo podemos mencionar un descubrimiento que se convertirá en una de las herramientas fundamentales de la física: la teoría de los campos.[20] A partir de ésta, Maxwell y otros ampliarán su enfoque a todas las acciones a distancia, en particular a la gravitación de Newton.

El trabajo de Faraday será comprendido, retomado y ampliado por el otro "genio" del siglo: Maxwell. Este escocés orgulloso de su origen logrará una de las más impresionantes síntesis jamás realizadas en la física. La expresará de manera simple: en siete ecuaciones que resumen todas las leyes sobre el magnetismo y la electricidad, tal como fueron descubiertas por Oersted, Ampère o Faraday.[21]

Sus ecuaciones se extienden también a la luz. Como había presentido Faraday, ésta viene a ser una especie de "prima de la electricidad". Se trata de la segunda unificación: Maxwell unifica magnetismo, electricidad y óptica. Al mismo tiempo y sin proponérselo sienta las bases de lo que pronto será la radio, con todas las consecuencias prácticas que conocemos, pues las ondas de radio forman parte de sus ecuaciones. Lo que las diferencia de la luz es que sus longitudes de onda (la distancia recorrida en una pulsación) son mucho más grandes. En el caso de la luz se trata de micrones; en el de la radio, de metros o kilómetros. ¡No obstante, cuando Maxwell formuló sus ecuaciones ni siquiera se imaginaba su existencia! Fue el alemán Heinrich Hertz, alumno del gran físico alemán Helmholtz,[22] quien años más tarde descubrió las ondas de radio y mostró sus semejanzas con la luz refleján-

[20] Lo estableció mediante su famoso experimento de la limadura de hierro distribuida alrededor de un imán. Señala las curvas que se dibujan "a partir" de los dos polos del imán y concluye que se trata de sus líneas de fuerza. Una partícula de hierro situada a cierta distancia será atraída hacia el "campo de fuerza" creado por el imán. Extenderá esta idea a la electricidad, y hablará por primera vez de los campos eléctricos.

En el plano de la física, este concepto de *campo* resultará de la mayor importancia, ya que relacionará las acciones a distancia y las acciones de contacto. Newton consideraba su ley de la gravitación como una acción directa entre dos cuerpos en cuyo intervalo no había nada. Fourier, por el contrario, postulaba que el calor se propaga progresivamente, como la luz. La teoría de los campos restablece una continuidad para los fenómenos de acción a distancia.

[21] El número de las ecuaciones de Maxwell disminuirá como resultado del conocido efecto de la progresiva axiomatización de las teorías físicas.

[22] Helmholtz fue también un gran físico. Termodinámico y fisiólogo, estudió el influjo nervioso. Su reputación quedó un poco maltrecha por un desacuerdo con Maxwell, en el que resultó estar equivocado. Este error fue demostrado por su propio alumno, Hertz.

dolas sobre un espejo, focalizándolas y realizando con ellas fenómenos de interferencia. De este modo abrió el camino a Marconi y a la era de las telecomunicaciones.

A este conjunto coherente, el físico holandés Lorentz agregará dos hipótesis que destaparán la "caja de Pandora", es decir, el inicio de la microfísica. Lorentz propone la hipótesis de que las corrientes eléctricas "cerradas" de Maxwell son en realidad verdaderas corrientes de un fluido formado por partículas que portan la carga eléctrica: los electrones. Años más tarde, junto con su colega Zeeman, interpreta un curioso experimento realizado por este último acerca de la influencia de un campo magnético sobre los espectros luminosos. Zeeman demuestra que cuando se emite luz en un campo magnético, las rayas espectrales se desdoblan. Lorentz interpreta ese efecto como una prueba de que la luz se debe a movimientos de electrones en el interior de la materia, con una visión absolutamente profética que establece una primera asociación entre los movimientos de los electrones y la luz. Con Lorentz, la física clásica alcanza sus límites.[23]

Ni siquiera él imaginaba que su trabajo anunciaba una nueva era.[24]

¿El fin de la física?

El electromagnetismo, tal como lo expone Maxwell, no se queda atrás —en lo referente a presentación compacta, abstracta y completa— de la mecánica de Laplace y Hamilton o de la termodinámica de Clausius. Con estas tres obras maestras de rigor y elegancia formal, casi se podría decir que el siglo XIX fue el del nacimiento de la física como disciplina científica rigurosa y formalizada matemáticamente.

Los físicos de fines del siglo pasado estaban tan orgullosos de sus conocimientos que para ellos "la física había terminado", como se decía en la época de Lord Rayleigh, uno de los representantes más notables de la ciencia británica.[25]

Ciertamente, a la luz de nuestros conocimientos actuales, las otras disciplinas científicas estaban en esa época en un estado mucho menos "presentable" que la propia física.

[23] En realidad, la interpretación que hizo Lorentz del efecto Zeeman es totalmente "falsa", pues el efecto en cuestión sólo puede interpretarse con ayuda del formalismo cuántico. Sin embargo, este ejemplo muestra cómo una "buena idea" que surge en el momento correcto desencadena a veces una avalancha de descubrimientos.

[24] Lorentz también lleva a cabo importantes trabajos en mecánica, que Einstein utilizará en sus propios trabajos sobre la relatividad restringida.

[25] Lord Rayleigh decía: "Es verdad que no entendemos bien el efecto fotoeléctrico, pero eso no es muy importante". Se equivocaba rotundamente, como veremos en el capítulo siguiente.

QUÍMICA ("PRIMITIVA")

La química conquistó muy pronto su identidad, a saber, la investigación de la naturaleza de los materiales y las maneras de transformarlos. Sin embargo, tardó mucho tiempo en encontrar su paradigma unificador: el átomo y las relaciones que puede establecer.

La hipótesis propuesta en 1808 por Dalton, según la cual la materia está hecha de átomos diferentes cuyas asociaciones múltiples dan origen a los diversos compuestos, desatará una polémica que se extenderá a lo largo del siglo XIX (recuerdo a un maestro de química de la Universidad de París, en los años sesenta del siglo XX, que aún expresaba dudas sobre la existencia de los átomos) y que se relata maravillosamente en el libro de Bernard Pullman.[26] Gay-Lussac y Avogadro, trabajando en forma simultánea y paralela sobre las propiedades de las mezclas gaseosas, formulan la hipótesis de que los compuestos gaseosos son conjuntos de miles de millones de moléculas. Pese a que hablan de lo mismo, Dalton por una parte y Gay-Lussac y Avogadro por la otra, en vez de sumar esfuerzos nunca se pondrán de acuerdo. Para Dalton, hay átomos simples que al asociarse dan origen a los átomos complejos. Para Avogadro, hay moléculas complejas que al disociarse producen moléculas simples. Este diálogo de sordos se prolonga hasta 1860, cuando en el marco del Primer Congreso Internacional de Química en Karlsruhe se decide que los elementos están hechos de átomos y que éstos al unirse constituyen moléculas. A partir de ahí se establece la notación química, la lengua de los químicos que perdura hasta nuestros días.[27]

No obstante, lo que se decidió por mayoría en este congreso no logra imponerse a la comunidad científica. La teoría atómica seguirá siendo combatida con vigor tras el congreso de Karlsruhe. Uno de los químicos más brillantes de la época, Henri Sainte-Claire Deville, declara en 1867: "No acepto ni la ley de Avogadro, ni los átomos, ni las moléculas, ni las fuerzas, ni los estados particulares de la materia, y me niego por completo a creer en algo que no puedo ver o siquiera ima-

[26] Bernard Pullman, *L'Atome*, París, Fayard, 1995. Se trata de una lectura imprescindible.

[27] H para Hidrógeno, O para Oxígeno, etc., son los símbolos de los elementos químicos. La unión de dos átomos de hidrógeno con un átomo de oxígeno para producir una molécula de agua se escribe H_20. Cuando se escribe una reacción química como $O_2 + 2H_2$ Æ $2H_2O$, significa que una molécula de oxígeno (formada por la unión de dos átomos de oxígeno) reacciona con dos moléculas de hidrógeno (formadas por la unión de dos átomos de hidrógeno) para producir dos moléculas de agua. Sería absurdo, desde el punto de vista químico, escribir 2O + 4H Æ H_4O_2, lo que muestra que la notación química va mucho más allá de la simple aritmética.

ginar". El principal y mas férreo detractor fue el gran Marcellin Berthelot, quien no obstante contribuyó con su talento a aplicar la termodinámica a la química y a explorar lo que se denomina reacción química.[28] Berthelot rechaza el concepto de átomo con toda su fuerza, la cual era considerable, pues en la época controlaba el campo de la química en Francia y numerosas publicaciones. Se opone en nombre del "energetismo" y del positivismo, la teoría que postula un estudio objetivo de la naturaleza, meramente fenomenológico y sin intentos de explicación. Otros sabios que realizaron aportaciones notables a la química, como Mach, Ostwald —futuro premio Nobel— o Pierre Duhem, también combatirán la teoría atómica.

Sin embargo, el estudio de la electrólisis por Michael Faraday, las interpretaciones del sueco Berzelius y posteriormente las observaciones del movimiento browniano por el botánico Brown, al permitir ver al microscopio las agitaciones de una emulsión, confirman la tesis de la naturaleza particular de la materia, pese a lo cual muchas personas se niegan a creer en lo que no pueden ver; se niegan a admitir, según reza la fórmula de Jean Perrin, la existencia de lo invisible simple para comprender lo visible complejo. Los filósofos intervienen para justificar esta actitud: Hegel, Bergson, Schopenhauer, Marx y, desde luego, el inefable Auguste Comte. Este último, egresado del Politécnico, republicano, racionalista, maestro intelectual de la Tercera República y (¡por desgracia!) de Jules Ferry, condenó los átomos, el microscopio, el telescopio y el cálculo de probabilidades... ¡en nombre del positivismo objetivo!

Para evitar a toda costa la interpretación corpuscular, los químicos se afanarán en desarrollar reglas heurísticas como la teoría de las equivalencias, o insistirán en el enfoque termodinámico, considerado más matemático y por lo tanto más "científico"...

Sin embargo, a partir de un estudio sistemático y minucioso de los pesos atómicos, los elementos y sus combinaciones químicas, el químico ruso Mendeleiev, siguiendo los pasos del alemán Lothar Meyer, dará a la química su primer enfoque sistemático al elaborar la tabla que clasifica los elementos por familias, dando cuenta de la periodicidad de sus propiedades. Se trata de una clasificación explicativa, un extraordinario resumen de la química, elemento por elemento, según

[28] Lo hace utilizando la termodinámica clásica, y sobre todo prescindiendo de la "diabólica" termodinámica estadística de Boltzmann, basada en los conceptos de partículas atómicas o moleculares. Gibbs, en Estados Unidos, será el único en hacer la relación entre termodinámica química y física estadística. La idea básica de la termoquímica es muy simple: las reacciones químicas absorben o desprenden calor; a partir de ahí se puede establecer la relación entre esta manifestación energética y la posibilidad más o menos grande de producirse que tiene una reacción.

la identidad y afinidades y su agrupación por familias. La periodicidad es el indicio de que, bajo la aparente diversidad de sus propiedades, todos los elementos químicos poseen una lógica subyacente más fuerte, una especie de denominador común, que es, desde luego, el átomo. Pese a ello y pese a notar que su tabla constituía un argumento a favor de la hipótesis atómica, el propio Mendeleiev nunca se compromete verdaderamente en la polémica. Esta polémica acerca de la naturaleza corpuscular de la materia trajo un retraso de cien años en la química. Hemos insistido en ello porque es un buen ejemplo de la "historización" de la ciencia.

El segundo debate que dividirá a los químicos del siglo XIX es el de la "fuerza vital". Durante mucho tiempo se pensó que la materia viva, compuesta de carbono y nitrógeno, era particular y que sólo los seres vivos eran capaces de sintetizar las moléculas que la constituían. La síntesis en laboratorio de la urea, realizada por Wöhler en 1828, debía haber puesto fin a esta idea, pero no fue así: para los partidarios de la fuerza vital bastaba con distinguir, de entre los elementos componentes de lo vivo, los simples y por lo tanto sintetizables químicamente, y los complejos y específicos de la materia viva.

Con Pasteur, la simetría se vuelve un elemento esencial en este debate.[29] Según él, la vida se caracteriza por la asimetría molecular, mientras que la química de laboratorio sintetiza siempre compuestos "simétricos". Este debate filosófico estimulará a la vez la síntesis química, es decir la fabricación de compuestos (de moléculas) a partir de sus elementos constitutivos (átomos), y el análisis bioquímico, o sea la investigación sobre la naturaleza química de la materia viva. Esto será válido hasta fecha reciente, y de ningún modo negativo para el desarrollo de la química.

Llama la atención que, a lo largo del siglo XIX, esta química dispersa, dividida y desgarrada por las querellas teóricas no deja de progresar, debido a ciertas necesidades económicas y acumula un considerable cúmulo de hechos observables.

La química de esta época está formada en primer lugar por la industria de la transformación, que permite cambiar las materias primas en productos manufacturados, como la sosa, el potasio, el amoniaco, el ácido sulfúrico y el ácido nítrico. Se desarrolla la metalurgia y se empieza a utilizar la síntesis orgánica con fines industriales. Al final

[29] La molécula de ácido tártrico existe en dos formas: derecha e izquierda. Las dos moléculas tienen formas simétricas con respecto a un espejo y por lo tanto no pueden superponerse. Las que se extraen de la materia viva son de forma izquierda y las que se sintetizan en laboratorio son mezclas formadas por derechas e izquierdas, a las que se denomina racémicas. Cabe señalar que un químico como Pasteur recurría al concepto de moléculas inanimadas.

del siglo, la química se presenta como una disciplina enriquecida con gran cantidad de observaciones, técnicas y conocimientos múltiples pero que todavía cuesta trabajo sistematizar. Muchos, sobre todo los físicos y Auguste Comte, la consideran más bien un conjunto de "recetas de cocina" a las que se les pone la etiqueta científica "por protección". En contraparte, es considerada esencial por los industriales, y por haberlo comprendido a tiempo, para Alemania representará un importante y duradero polo de desarrollo económico.

Geología

Si había una ciencia que parecía fundamental a principios del siglo XIX, era la geología. ¿Acaso no se ocupaba de nuestros orígenes y se podía vincular directamente con las Santas Escrituras?[30]

La geología moderna nació en Escocia a fines del siglo XVIII, gracias a la contribución esencial de Hutton en 1795. Su nacimiento la introduce de inmediato en un largo debate científico-teológico donde los "plutonianos" y los "neptunianos" tienen posiciones opuestas sobre el origen de las rocas. Para los "plutonianos", discípulos de Hutton (muerto prematuramente en 1797), las rocas terrestres tienen un doble origen. Algunas, como el basalto o el granito, son resultado del enfriamiento del magma fundido; por ello son producto del "fuego interior" (de ahí el nombre derivado de Plutón, dios de los infiernos). Las otras son "secundarias" y resultan de la erosión de las primeras: son las rocas sedimentarias, como la arenisca, las rocas arcillosas o calcáreas. Unas y otras sufren plegamientos debido a movimientos cuyo origen debe buscarse en el interior del planeta (nuevamente Plutón).

Para los neptunianos (Neptuno era el dios de los mares), cuyo principal vocero es Werner, profesor en Freiberg, Sajonia, todas las rocas se depositaron inicialmente en el fondo de los mares: en los mares cálidos del océano primitivo en el caso de los granitos; en los tibios, en el caso de los esquistos; y las rocas calcáreas en los mares templados del océano moderno.

Para Werner, el agua —y por lo tanto el océano, la lluvia y el cielo— gobierna todo, mientras que para Hutton el centro de la Tierra —el Diablo, dirán sus detractores— es el motor de la historia geológica. Según Werner el "fuego interior" crea las rocas "primarias", granitos y basaltos, las montañas; el agua del cielo, al correr, no hace más que erosionar, limar y gastar el relieve ya existente. Así se establecen en la Tierra sucesiones de ciclos geológicos idénticos que se repiten cons-

[30] Véase mi libro *De la pierre à l'étoile*, París, Fayard, 1985.

tantemente y en los que se alternan fases de creación de relieves y fases de erosión de esos mismos relieves.

Los roles de constructor y destructor asignados respectivamente al fuego interior (es decir, al Diablo) y al cielo (es decir, a Dios) desatarán la ira de la Iglesia anglicana, poderosa en la medida en que todos los profesores de geología ingleses de esa época eran pastores. En Edimburgo se realizan debates públicos, se organizan excursiones geológicas contradictorias a los sitios y las dos teorías se enfrentan con gran violencia verbal e intercambios de argumentos casi siempre más emocionales que racionales. Un religioso declara: "¡No puedo creer que se atrevan a criticar las Escrituras aduciendo la observación de un esquisto! Decididamente, los geólogos son gente muy poco seria".

Esta primera justa se inclina rápidamente en favor de los plutonianos, por razones simplemente técnicas: la teoría de Hutton ofrece las bases para la interpretación objetiva de las observaciones de campo,[31] ya que permite al investigador reconstruir la historia geológica a partir de observaciones concretas precisas, dando paso a una geología "científica". El geólogo se convierte en un detective que busca sobre el terreno, observando las rocas, indicios que le permitan reconstruir la historia geológica. En cambio la teoría de Werner es mucho más general: se apoya en argumentos de conjunto, en cartografías generales que no pueden traducirse de manera muy concreta sobre el terreno. En suma, el triunfo de Hutton es el triunfo de la teoría basada en la observación directa.

Hacia 1830, con el triunfo de las tesis plutonianas, cabría esperar que el debate geológico-religioso se extinguiría, pero resurge con nuevos bríos, aunque bajo otra forma. Ahora se centra en la existencia o no de grandes catástrofes naturales que al parecer marcaron la historia geológica. El dilema es el siguiente: ¿la Tierra evolucionó debido a una serie de catástrofes celestes de orígenes y desarrollo oscuros pero que han revolucionado el planeta a intervalos regulares, o su evolución es resultado de la "infinita acumulación" de fenómenos geológicos como los que observamos ante nuestros ojos?

El inglés Charles Lyell defiende las llamadas tesis "actualistas" mientras que el francés Georges Cuvier se convierte en el abogado de la evolución por "catástrofes".

El debate hace furor. No hay necesidad de apelar a causas grandiosas,

[31] Hutton había observado un filón de granito que contenía rocas sedimentarias plegadas. De ahí concluyó que el granito es una roca de origen profundo, posterior a los plegamientos, que a su vez son posteriores a los depósitos sedimentarios. Observando los restos de una roca en otra, dedujo que la segunda era posterior, etc. Toda su teoría se basa en este tipo de anotaciones. Así le da un alcance teórico a la observación.

oscuras y desconocidas, dicen unos: el vulcanismo, la sedimentación, los plegamientos, en suma, todo lo que se puede ver en proceso actualmente basta y sobra. Recurriendo a periodos largos se puede explicar todo. ¿Acaso las pequeñas causas acumuladas no acaban por producir grandes efectos, como la erosión de una montaña? Pero, a la inversa, ¿los cambios brutales en la naturaleza de la fauna y la flora fósiles no son la prueba de la realidad de las catástrofes?, se preguntan los otros. Y añaden para sus adentros: ¿no es esto lo que nos dice la Biblia en el episodio del Diluvio?

El debate se inclinará en favor de las tesis actualistas de Lyell, que permiten trabajar de manera simple, sin multiplicar las hipótesis, y corresponden a las observaciones de campo.

Hacia la década de 1850, la geología recobra su tranquilidad y se aleja de los debates científico-religiosos. Es verdad que la Iglesia de Inglaterra se hallaba entonces enzarzada en una nueva polémica que causa gran revuelo: la provocada por un joven naturalista discípulo de Lyell, un tal Charles Darwin...

Escaldada por el tremendo impacto de sus debates teóricos, la geología tenderá entonces a replegarse en una actitud pretendidamente "objetiva" y se dedicará a la acumulación de hechos observables. Florecerá la actividad clasificadora: se clasifican las rocas, los fósiles, las formas del relieve, las etapas geológicas, etc. La cartografía geológica, cuyos métodos fueron inventados por Lavoisier y Guettard, empieza a ocupar un lugar preponderante. La geología se presenta así en esta época como una ciencia austera, difícil, un tanto esotérica. Pese a los esfuerzos realizados a fines de siglo por el austriaco Eduard Suess, quien publica su monumental obra *La faz de la Tierra,* sigue siendo, como la química, una disciplina fragmentada, clasificadora más que sintética, y que desconfía de las teorías. Y al igual que la química es de gran "utilidad" para buscar (y encontrar) minas, explotar el carbón, construir carreteras, perforar túneles o abrir canales. Sin embargo está muy lejos de las síntesis rigurosas y armoniosas de la mecánica o el electromagnetismo.

Biología

Ésa es también —o casi— la situación de la biología a fines del siglo pasado, pese a que durante el mismo vivió cinco "revoluciones importantes" que llevaban en germen los florecimientos posteriores, decisivos y espectaculares.[32]

[32] Véase *La Logique du vivant: une histoire de l'hérédité,* de François Jacob, París, Gallimard, 1976, obra esencial para quien desee comprender la historia de la biología.

La primera revolución se debió a Charles Darwin, con su teoría sobre la evolución de las especies. Desde hacía dos siglos intrigaba a los filósofos de la naturaleza la doble característica de lo vivo: por una parte, su diversidad de formas, y por la otra, el sentimiento vago de que todos los seres vivos obedecen a un principio común, el famoso "molde interior" de Buffon. Se había discutido mucho sobre los límites de lo vivo y disertado sobre las relaciones entre lo mineral y lo vivo: los científicos se preguntaban si las plantas pertenecían a uno u otro.[33] El sueco Linneo había clasificado las especies vivas de acuerdo con principios jerárquicos que implícitamente debían corresponder a algo más profundo. ¿Pero qué? ¿Cuál era ese hilo de Ariadna?

A estas preguntas y muchas otras responde Charles Darwin diciendo: "Todas las especies vivas se derivan unas de otras. Lo vivo es uno. La diversidad de lo vivo no es más que una variación a partir de un mismo sustrato, no es más que lo particular a partir de lo general".

Las especies cambian, evolucionan con el tiempo; entre todas estas evoluciones, la selección natural elige, selecciona las variaciones más adaptadas. A partir de allí nacen las nuevas especies. Darwin comprende mejor que nadie el papel del tiempo. Menciona como ejemplo al elefante, animal que está en desventaja por la lentitud de su reproducción: "Si aceptamos que espera hasta la edad de 30 años para procrear, que vive hasta los 100 años y que durante ese intervalo produce seis crías, la descendencia de una sola pareja se elevaría a casi 19 millones de elefantes tras 750 años..." Esto permite la aparición de un gran número de mutaciones, de variaciones. Así, con el tiempo aparecen por accidente variedades y luego nuevas especies, entre las cuales algunas son seleccionadas y en consecuencia se perpetúan.

Esta idea, que otros como Lamarck habían entrevisto o, como Wallace, expresado en los mismos términos pero obteniendo menos atención, constituyó como sabemos una bomba filosófica, sobre todo porque Darwin no vaciló en afirmar que el hombre también entraba en su teoría y que nuestro antepasado fue una especie de mono. En el plano espistemológico, ése fue el primer esfuerzo que se hizo para dar cierta coherencia a la biología.

Las modalidades de la evolución le asignan el papel principal a la selección natural, al azar, especie de selección de lo deseable entre lo posible. Esta teoría combatida, criticada y vilipendiada, seguirá siendo no obstante la piedra angular de la renovación biológica hasta nuestros días.

La segunda revolución la inicia Pasteur,[34] y es más gradual: al negar

[33] Véase Jean-Paul Poirirer, *Le Minéral et le vivant*, París, Fayard, 1995.

[34] P. Debré, *Louis Pasteur*, Flammarion, 1995, y P. Darmon, *Pasteur*, París, Fayard, 1995.

la generación espontánea e inventar la microbiología confirma lo dicho por Darwin: al inventar la inmunología, refuerza el concepto de la unidad de lo vivo, prefigura la noción de interacciones moleculares y establece el lazo entre funcionamiento biológico y actividad química. Y por último —mas no menos importante—, junto con Claude Bernard, sienta las bases científicas de la medicina y teje su indisoluble lazo con la biología. El hombre no está fuera del mundo vivo; es un ser vivo entre muchos otros, dicen ambos.

La tercera revolución alcanzará su culminación con Virchow: el nacimiento de la teoría celular. Los seres vivos están constituidos por células, y estas células son a su vez producto de lo vivo. La frase de Virchow que cita François Jacob es inequívoca: "Todos los animales son la suma de unidades vitales, y cada una de ellas contiene todos los caracteres de la vida". Vemos ahí un reforzamiento implícito de la idea de unicidad de lo vivo pero, al mismo tiempo, de su especificidad, combinada con una analogía —que será explotada y repetida hasta la saciedad— entre el átomo y la célula: el átomo, unidad elemental de la materia; la célula, unidad elemental de lo vivo.

La cuarta revolución, complementaria de las dos anteriores, es la que inicia Claude Bernard al fundar al mismo tiempo la fisiología y la experimentación biológica. En una época en que se fustiga fácilmente la crueldad de la experimentación con animales, la gente se estremece sólo de pensar en las disecciones de animales vivos que realizaba durante sus clases en el Collège de France. Sin embargo, como subraya Jean Bernard, ¡cuántas vidas humanas se salvaron gracias a las enseñanzas que allí obtuvimos! Con esta sistematización de la experimentación, Claude Bernard acerca la biología a la química y la física. La biología entra en el laboratorio. De ser una ciencia de observación, se convierte en ciencia experimental, lo que equivale para muchos a un "ascenso social" en la "escala de las ciencias". Con la invención de la fisiología, Claude Bernard introduce el concepto de "sistema vivo". Comparando explícitamente el cuerpo humano con una fábrica química, se anticipa a lo que siglo y medio más tarde será la maquinaria molecular de Jacques Monod y Francois Jacob.

La quinta revolución, una de las más profundas, es la que impulsará el monje austriaco Gregor Mendel al inventar la ciencia de la herencia: la genética. En el origen de la revolución genética[35] están sus experimentos con chícharos de diferentes colores y más o menos arrugados, interfecundados con astucia.

[35] Ésta es, resumida, la observación fundamental de Mendel: cuando se cruzan chícharos verdes y amarillos, todos los chícharos de la primera generación son amarillos; en la segunda generación, tres cuartas partes son amarillos y una cuarta parte es verde. De este experimento se

No obstante, si bien hoy podemos reconocer en medio de todos esos elementos los inicios de la extraordinaria revolución biológica de la segunda mitad de nuestro siglo, en esa época seguían estando dispersos, fragmentados, separados en capítulos diversos denominados zoología, botánica, fisiología, microbiología (esta última todavía muy marginada) y bioquímica (todavía muy orientada hacia la clasificación). De hecho, esta visión de la biología permanecerá intacta hasta que el gran florecimiento de la biología molecular desborde las barreras y abra nuevos espacios.

A fines del siglo XIX, el espacio científico se divide así en dos apartados. Por una parte, las ciencias racionales rigurosas, que descansan sobre algunas hipótesis unificadoras que utilizan la matemática como lenguaje exclusivo. Se trata de las diversas divisiones de la física: mecánica, termodinámica y electromagnetismo. Y por la otra, las ciencias naturales, dispersas, fragmentadas, casi anecdóticas, en las cuales la compilación y la acumulación de hechos suelen sustituir a la síntesis, y la clasificación y el empirismo dominan zonas enteras del conocimiento, y no existe una teoría que les dé unidad, que las sintetice.

La enseñanza, que tras la llegada de la Tercera República y bajo el impulso de Jules Ferry logra en nuestro país un auge decisivo, sacará pronto una conclusión de esta dicotomía: junto con las matemáticas, aunque ligeramente menor, la física se convertirá en la base de la enseñanza, y por tanto en materia obligatoria; las demás sólo serán materias minoritarias, periféricas, "opcionales".

Todo está dominado por la visión que formalizó y jerarquizó Auguste Comte: en lo más alto, la ciencia que sólo debe sus éxitos a la inteligencia humana, es decir, las matemáticas; a su lado, la física, que mostró sobre todo con la mecánica y la termodinámica que podía alcanzar un grado comparable de formalización, abstracción y poder deductivo; y "en otra parte" las ciencias naturales.

¡Qué contraste entre el rigor de una física que no sólo se presenta bajo la forma de síntesis armoniosas y rigurosas sino que además dio origen a la electricidad, el avión , el automóvil, la radio o el teléfono, y esas ciencias a medias, formadas por simples hechos dispersos y que se "conforman" con observar la naturaleza! No hay comparación entre un teórico de la física y un coleccionista de minerales o mariposas. Las ciencias de la naturaleza despiertan interés, los problemas que plantean son apasionantes, ¿pero es posible formar la inteligencia de las

deducirá que el cruzamiento de la primera generación produce una asociación amarillo/verde, pero como el carácter amarillo domina al verde, éste es el único aparente. En la segunda generación, tendremos asociaciones amarillo/amarillo, amarillo/verde, verde/amarillo, verde/verde. Así se establece que, durante la fecundación, el macho y la hembra aportan cada uno su firma.

élites con ayuda de disciplinas clasificadoras, fragmentadas, sin teorías?

Tal es el razonamiento de Auguste Comte; el de los radicales, republicanos positivistas y "comecuras" que fundan la escuela pública. Razonamiento que, por desgracia, sobrevivirá casi intacto hasta hoy.

Tal es, en todo caso, la visión de la Ciencia con que ingresa al siglo XX la Europa continental. Es cierto, con algunas diferencias entre países latinos y protestantes, entre el norte y el sur. Pero al menos en el caso de Francia y Alemania, esa visión será la referencia obligada.

II. LOS FUEGOS ARTIFICIALES DE PRINCIPIOS DEL SIGLO XX

A FINES DEL SIGLO XIX, Europa mostraba contrastes sorprendentes.

Inglaterra, tras la conquista de la India, se hallaba en el apogeo de su poderío. La reina Victoria simbolizaba ese equilibrio entre las conquistas y la prosperidad. La ciencia británica seguía dominando el mundo, tal como lo había hecho desde hacía un siglo, a partir de un centro inigualable: la Universidad de Cambridge.

En el continente, la situación era muy distinta. Humillada en 1870, Francia achacaba su derrota a su atraso científico y rumiaba su venganza. La naciente III República se había propuesto la reconquista por medio de la razón. Sin embargo, ya no contaba con muchos de sus grandes sabios: Carnot, Ampère, Poisson y Fresnel habían muerto desde hacía tiempo; Pasteur acababa también de fallecer; únicamente destacaban dos grandes figuras: Henri Poincaré, quien a sus 40 años estaba considerado el mayor físico-matemático del mundo, y un joven normalista brillante, el físico Jean Perrin.

Alemania vivía entonces bajo el yugo imperial del káiser, que acababa de eliminar a Bismarck y aspiraba a dominar al mundo en todos los campos, incluido el científico. Albergaba un semillero de eminentes sabios entre los que brillaban Helmholtz y Ostwald (el adversario de la hipótesis atómica).

Austria vivía aún su esplendor y la *intelligentsia* vienesa daría al mundo sus mentes más notables. Rusia, nación rica en sabios de gran originalidad, empezaba a entrar en una zona de turbulencias. Tal vez el país más interesante de esta época era Holanda, donde se agitaba una legión de físicos valiosos, dominados por la figura señera de Lorentz, mundialmente célebre.

Del otro lado del Atlántico, el Nuevo Mundo acababa de crear sus primeras universidades y empezaba a destacarse en el terreno científico, pero por entonces, se limitaba a imitar a Europa. Por su parte, a Japón, que en esa época desarrollaba sus ambiciones belicosas en Asia, le preocupaba más la gloria que el saber.

En este contexto internacional se inicia el siglo XX.

En ese mundo, en el que la electricidad aún es escasa, el teléfono —como el automóvil— es todavía un rareza, y sólo en trasatlántico se puede llegar a América. El número total de físicos no llega a un cente-

nar. No obstante, la ciencia del nuevo siglo arranca de manera espectacular. El periodo que se extiende de 1895 a 1930 es uno de los más fecundos de la historia científica de la humanidad, sobre todo en lo relativo a la física.

En 35 años el hombre logró comprender repentinamente cómo estaba formada la materia, lo que no es poca cosa. El átomo, concepto vago y controvertido desde que los griegos Leucipo y Demócrito lo propusieron y que fue retomado con decisión a principios del siglo XIX por el químico Dalton, empezó a revelar sus secretos. El espacio y el tiempo adquirieron la misma jerarquía en la teoría propuesta por Einstein, llamada de la relatividad, y se dio una explicación unificada a la luz. Asimismo, los descubrimientos hechos durante este corto periodo alentaron el florecimiento de la química, el nacimiento de la física nuclear, la física atómica, la física de los sólidos y la astrofísica: en suma, lo que se conocerá como el mundo cuántico, y dieron como resultado innovaciones tecnológicas familiares a partir de entonces, como los rayos X , los reactores nucleares, los transistores, los rayos láser, etcétera.

Los héroes de la primera mitad de este periodo anterior a 1914 son Einstein, Bohr, Rutherford, Von Laue, Roentgen, Pierre y Marie Curie, Becquerel, Planck, Perrin, Poincaré y Thomson, entre muchos otros. Nombres conocidos para todos los físicos, y a los que se sumarán tras la guerra de 1914-1918 los de Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Pauli, Born, Frédéric e Irène Joliot, Chadwick, Langevin y Fermi. Todos ellos fueron héroes de una gran aventura que por desgracia permanece prácticamente desconocida para el público en general, pese a la existencia de una bibliografía abundante de la que sólo mencionaremos aquí unos cuantos pasajes evocadores.

Los tubos de vacío

Todo empezó con los experimentos de descargas eléctricas en un tubo de vacío. El principio es simple y consiste en sacar de un tubo de vidrio el gas que contiene. Esta operación está lejos de ser perfecta y en el tubo queda un gas residual. Este gas se somete a una diferencia de potencial creada por un ánodo y un cátodo. Viene a ser una especie de electrólisis con los gases. Pero sus efectos son muy diferentes; cuando se conecta la corriente se produce una descarga eléctrica, un flashazo, y el tubo se ilumina (es lo que pasa con nuestro moderno tubo de neón).

Los primeros experimentos fueron realizados por Faraday (de

nuevo), pero desde antes otros investigadores, como Crookes, habían hecho mejoras notables, relativas sobre todo a la manera de provocar el vacío dentro del tubo, es decir, de dejar menos gas.

Las descargas eléctricas en los gases daban pie a interpretaciones contradictorias: los alemanes, agrupados en torno a Hertz, afirmaban que el fenómeno se debía a las ondas de radio; los ingleses pensaban que se trataba de partículas cargadas. Ondas contra partículas: otra vez encontramos el debate entre Huygens y Newton sobre la naturaleza de la luz, el cual será reavivado por dos descubrimientos aparentemente contradictorios.

Los rayos x

El primero de estos descubrimientos se debió a Roentgen, en 1895.

Después de haber colocado un pedazo de metal frente al cátodo, el investigador rodeó el tubo de descargas con papel negro. Para su sorpresa, descubrió que una pantalla fluorescente situada a unos metros de distancia se iluminaba. Y lo mejor: cuando colocó su mano entre el tubo y la pantalla se proyectó sobre ésta el esqueleto de la mano. Roentgen sustituyó entonces la pantalla fluorescente por una placa fotográfica y fotografió los huesos.

Este descubrimiento tendría consecuencias extraordinarias en la medicina, donde comenzó a usarse cotidianamente apenas tres meses después de haberse realizado. En el terreno de la Física, Roentgen se sintió con derecho de afirmar que había descubierto unas ondas, con lo que validaba la interpretación "alemana".[1]

El electrón

La "respuesta" del "bando" contrario se dio en dos etapas. En la primera, el francés Jean Perrin utilizó un imán para desviar la descarga, envió ésta hacia una jaula de Faraday y observó una corriente eléctrica. Después, J. J. Thomson, utilizando un vacío más adecuado y un campo eléctrico, mostró en 1897 que los "rayos catódicos" golpeaban el vidrio que se volvía fluorescente, produciendo chispas, ya sea discretas o en haces. Retomando la idea de Lorentz, afirmó que las descargas eléctricas estaban formadas por corpúsculos de electricidad: los electrones. Determinó entonces la carga eléctrica del electrón, mar-

[1] No obstante, habrá que esperar 16 años y a que llegue Max Von Laue para entender que esos rayos son de la misma naturaleza que la luz y que también están regidos por las ecuaciones de Maxwell.

cando una gran etapa en el desarrollo de la física moderna. La interpretación "inglesa" había dado un paso decisivo.

RADIOACTIVIDAD

Mientras tanto, en Francia continuaban las investigaciones. Fue así como en 1896, mientras buscaba penetrar en los secretos de los misteriosos rayos x y multiplicaba sus experimentos utilizando placas fotográficas, Henri Becquerel, profesor en el Museo de Historia Natural, descubrió casualmente la radioactividad. "El azar es el aliado de las mentes que están preparadas para explotarlo", decía Pasteur. Un mineral amarillo, obsequio de un amigo checo,[2] puesto por casualidad sobre su escritorio como adorno, vela unas placas fotográficas que estaban guardadas en los cajones. Becquerel se da cuenta de que esas piedras amarillas emiten una radiación parecida a los rayos x.

La explicación a este fenómeno la darán, entre 1898 y 1902, Pierre y Marie Curie en Francia, y el británico Ernest Rutherford, quien trabajaba entonces en Canadá. Se trata de transmutaciones espontáneas de átomos. Un elemento químico llamado radioactivo se transforma en otro elemento químico, mientras emite partículas y radiaciones, las mismas que afectaban las placas fotográficas de Becquerel.

Los trabajos efectuados por este trío de científicos y otros investigadores permitirán comprender la naturaleza del fenómeno y determinar sus leyes. Los Curie mostraron que esta radioactividad de los minerales de uranio no es única, sino que se trata de una cascada de radioactividades sucesivas. El uranio es el punto de partida, pero hay toda una serie de productos intermedios, todos radioactivos, que se desintegran unos en otros para llegar finalmente al plomo. Rutherford y su colega Soddy tendrán la increíble audacia de proponer que esta desintegración radioactiva no depende ni de la forma química en que se presenta el elemento, ni de la temperatura, ni de la presión; el proceso de desintegración es un verdadero reloj que obedece a una ley estadística precisa; su ritmo es característico del elemento radioactivo y de ningún otro.

Este descubrimiento representa un viraje decisivo en la ciencia moderna, por varias razones. En primer lugar sugiere que si los átomos emiten "partículas", a su vez están formados por ellas. De ahí la idea de que los átomos son conjuntos complejos, que resultará tan profética como la idea de que estos conjuntos de partículas son a veces estables, como los átomos "normales", comunes, y a veces inesta-

[2] Se trataba de uraninita, mineral de uranio de la mina de Joachimstal, en Bohemia.

bles, como los átomos radioactivos. La desintegración de elementos que se transforman unos en otros muestra que entre los átomos hay un parentesco, una arquitectura ensamblable que la radioactividad puede diseccionar al separar sus diferentes fragmentos. El descubrimiento que hicieron los Curie de los radionucleidos en cascada, cada uno de los cuales se deriva de uno y da origen a otro, es un paso decisivo.

De manera más indirecta, las partículas que emite la radioactividad servirían como proyectiles destinados a efectuar experimentos con la materia. Con ellas se bombardea una laminilla de metal y se observa el resultado. Así es como Rutherford descubre en 1911 la estructura del átomo. El científico muestra que éste consiste en un núcleo central pesado y minúsculo,[3] que concentra toda la masa y está rodeado por una nube de electrones ligeros cuyos movimientos incesantes ocupan casi todo el volumen. Los electrones, con carga eléctrica negativa, se mantienen alrededor del núcleo, cargado positivamente.

Se trata de la primera representación de un átomo, descubrimiento capital, ya que por primera vez desde los griegos, se cuenta con una "imagen" de esos famosos "granos de materia" cuya existencia dividió a los químicos durante todo el siglo XIX. Al mismo tiempo se descubre que el átomo no es una partícula única, una especie de esferita compacta y elemental de materia, sino que a su vez es un conjunto complejo, dotado de una estructura propia y original[4] (una especie de minisistema solar).

Radioactividad y geología

Para el geólogo, la radioactividad resolverá simultáneamente dos problemas: el del origen de la energía terrestre y el de la datación de las rocas.

La existencia de volcanes y temblores de tierra era una muestra de que la Tierra disipaba energía, pero ¿cuál era el origen de ésta? Todos coincidían en que era el calor residual de épocas primitivas en que la Tierra había sido una bola incandescente. A partir de entonces, lord

[3] Si el átomo tiene dimensiones de 10^{-8} cm, el núcleo tiene dimensiones de 10^{-13} cm. Repitámoslo una vez más: la notación en 10^n es simple: n designa el número de ceros que siguen a la cifra 1. Así: $10 = 1x10^1$, $100 = 1x10^2$, mil millones = $1x10^9$, etc. 2 mil millones se escribe $2x10^9$; 0.1 se escribe 10^{-1}; 0.0001 se escribe 10^{-4}, etc.

[4] Estos experimentos de bombardeo de partículas iniciados por Rutherford serán mejorados 15 años después por Frédéric e Irène Joliot, quienes descubrirán así la radioactividad artificial, permitiéndole a Chadwick hacer evidente uno de los constituyentes esenciales del núcleo: el neutrón. El otro compuesto del núcleo, el protón, con una masa parecida y cargado positivamente, ya había sido descubierto y nombrado por Rutherford.

Kelvin había mostrado, apoyándose en la teoría del calor de Joseph Fourier, que la superficie de la Tierra se enfriaba muy rápidamente y por lo tanto no podía tener más de un centenar de millones de años. Los geólogos, entre ellos Charles Darwin, refutaban esa cifra, ciertamente con argumentos más intuitivos que factuales. Cuando Laborde y Pierre Curie midieron el calor que desprendía la radioactividad, inmediatamente le dieron a Rutherford la idea de que ésta podía ser también la causa del calor terrestre, que se agregaría al calor primitivo. Al mismo tiempo se volvían caducos los cálculos de Kelvin. Desde entonces no ha dejado de confirmarse el punto de vista de Rutherford. La principal fuente de la energía interna de la Tierra es, en efecto, la radioactividad, que se halla en el origen tanto del vulcanismo como de la deriva de los continentes.

Por otro lado, la radioactividad que emite partículas y crea nuevos átomos a un ritmo inmutable constituye un verdadero reloj. Rutherford —otra vez él— tuvo la idea de utilizar este fenómeno para fechar las rocas, idea que tendrá profundas consecuencias sobre la evolución de la geología moderna.[5]

Los cuantos de energía

La otra "explosión" científica de este inicio de siglo se produciría en el terreno de la reflexión teórica. En 1901, para explicar la radiación del cuerpo negro, Max Planck introdujo con cierta reticencia la idea de que la energía que transportaba la luz estaba "cuantificada",[6] es decir, distribuida por paquetes, por cuantos de luz.[7]

En 1905 Albert Einstein retoma esta idea para explicar el fenómeno más misterioso de la física de esa época: el efecto fotoeléctrico, que consiste en iluminar una hoja de metal y que esta iluminación produzca

[5] Rutherford es uno de los mayores físicos de todos los tiempos. Los ingleses, grandes conocedores en materia científica, lo convirtieron en Lord (Lord Rutherford of Nelson) y lo enterraron al lado del gran Newton (su héoe nacional) en Westminster. La peor ironía fue que le concedieron el premio Nobel de química (y no de física) pese a que despreciaba abiertamente a los químicos de su época.

[6] En el mundo ordinario, el de la vida común y corriente, la energía de un cuerpo es una función continua. De este modo la energía cinética, la que se desarrolla corriendo, es proporcional a la masa y al cuadrado de la velocidad. Si se reduce su velocidad en un centímetro por segundo, se habrá reducido también su energía en la misma pequeña cantidad. Lo mismo sucede con la energía eléctrica o calorífica. En cambio, en el nivel microscópico no sucede así: la energía no puede variar sino por saltos, y cada salto de energía corresponde a un número entero de cuantos de energía. Así, si se representa la energía de un fotón de luz, se trata no de una curva continua sino de niveles separados, distintos como los peldaños de una escalera. Este carácter discontinuo, discreto de la energía es la esencia misma del comportamiento del mundo microscópico.

[7] Cualquier persona que se haya quemado con el Sol sabe que la luz transporta energía y que esta energía puede transformarse en otras formas de energía, por ejemplo calorífica.

una corriente eléctrica.[8] Einstein formula quizá la hipótesis más audaz del siglo: que la luz tiene dos aspectos: a veces onda y a veces partícula, y que la energía de la forma de partículas está directamente ligada a la longitud de onda de la forma ondulatoria, es decir, a su color. Según Einstein, la luz es como Dr. Jekyll y Mr. Hyde, en sus dos aspectos: a veces corpúsculos de luz llamados fotones, y a veces vibraciones llamadas ondas luminosas. Isaac Newton y Christiaan Huygens al fin se reconciliaban.[9] Así las dos concepciones que se tenía sobre la luz no eran antagónicas sino complementarias. Para Einstein, los corpúsculos de luz o fotones pierden su energía al golpear la hoja de metal y generan así electricidad, pero pierden su energía por cuantos, como lo había propuesto Max Planck.

El átomo de Bohr

Hacia la primera década del siglo, la idea de que la energía en el nivel microscópico sólo puede manifestarse por paquetes, por cuantos, está a la orden del día. Uno de los "gigantes" de este periodo, el danés Niels Bohr, hará suya esta afirmación y permitirá dar un paso decisivo en las ideas sobre la naturaleza de la materia. Para ello se valdrá del modelo cualitativo del átomo según Rutherford, y de las ideas sobre los quanta de Planck y Einstein. Ya conocía los experimentos con espectros ópticos producidos por varios elementos químicos cuando son sometidos al calor, y también conocía el efecto Zeeman y la demostración de Thomson sobre la naturaleza granular de la electricidad. Pasó un año hablando con Rutherford en Manchester. Sobre esta base, construye en 1913 un modelo cuantitativo del átomo: no del núcleo, al que considera un centro de atracción eléctrica puntual, sino de esa misteriosa nube de electrones que ocupa el espacio mientras gravita alrededor del núcleo. Bohr supone que los electrones se desplazan alrededor del núcleo en órbitas definidas, tal como los planetas se mueven alrededor del Sol. Sin embargo, los radios de estas órbitas están en proporciones definidas. Cuando el electrón permanece sobre una órbita, no emite energía. Cada órbita define un nivel de energía para el electrón. Cuando salta de una órbita a otra, el electrón debe absorber o emitir energía: absorberla para pasar a un nivel de energía superior y emitirla cuando vuelve a caer en un nivel de ener-

[8] Si la lámina de metal es puesta en el vacío y sometida a una diferencia de potencial.

[9] Einstein dirá más tarde que propuso esta hipótesis porque pensaba que Newton no podía haberse equivocado y que su teoría de los granos de luz era forzosamente exacta. Este trabajo le valdrá a Einstein el premio Nobel.

gía inferior. Bohr admite que esta energía se absorbe o disipa en forma de radiación luminosa. Además, para satisfacer las condiciones de Planck sobre la naturaleza de la luz, supone que la longitud de onda de la luz absorbida o emitida corresponde exactamente a la energía necesaria (al número de cuantos necesarios) para pasar de un nivel a otro.[10]

Al hacer esto, Niels Bohr relaciona la estructura del átomo con la emisión de luz, profundizando en las ideas de Lorentz. Cuando el átomo está excitado, sus electrones saltan de un nivel de energía a otro (transiciones cuya diferencia de energía corresponde precisamente a la longitud de onda 5980 Å[11] del color amarillo).

Partiendo de este modelo general del átomo, Bohr explica la estructura de los átomos de los diversos elementos químicos. El átomo de hidrógeno posee un electrón, el átomo de helio, dos, el de litio, tres, y así hasta llegar al uranio, que posee 92.[12]

Este gran avance teórico le valdría a su autor honores y respeto unánimes, despertaría un gran interés e impulsaría las investigaciones teóricas y experimentales sobre el átomo en toda Europa. La idea de que el movimiento de relojería planetaria existe tanto en la escala planetaria e incluso del Cosmos como en la escala microscópica del átomo no deja de seducir a los físicos, siempre ávidos de teorías unificadoras. Durante un tiempo se pensó que se había alcanzado el objetivo: el modelo planetario era universal, existía en todas las escalas. Desde entonces el modelo de Bohr sirvió como guía para interpretar experimentos fundamentales. En 1912 Von Laue había descubierto por fin la naturaleza de los rayos x: se trata de ondas electromagnéticas comparables a la luz, que al igual que ésta son emitidos mediante saltos de energía de los electrones de los átomos; sólo que estos saltos corresponden a energías mucho mayores, es decir, a longitudes de onda mucho más cortas. El joven estudiante inglés Moseley (quien morirá unos años más tarde en la expedición de los Dardanelos), interpreta en 1914 los experimentos hechos con rayos x sobre los átomos de los diferentes elementos con ayuda del modelo de Bohr. De este modo

[10] De hecho, cada órbita corresponde a una energía, a un peldaño en la escalera de la energía. Pasar de una órbita a otra corresponde a saltar de un "peldaño" de energía a otro. Para hacerlo, el electrón debe absorber o emitir luz. Pero como esta luz tiene su propia energía que varía por cuantos, se necesita precisamente que la haya. Por eso la longitud de onda de la luz emitida (o absorbida) durante un salto de un electrón se define por la naturaleza de ese salto.

Al hacerlo, Bohr explica también el principio de la iluminación eléctrica tanto por el calentamiento de un filamento incandescente (técnica que había hecho la fortuna de Edison en Estados Unidos) como por el neón, más moderno. En los dos casos se trata de emisión de luz por desexcitación de electrones atómicos.

[11] El angström = 1018 centímetros se representa Å. Es la unidad de medida atómica.

[12] Y "al mismo tiempo", 92 protones en su núcelo para equilibrar las cargas eléctricas.

abre el camino a la primera interpretación teórica de la tabla de los elementos químicos de Mendeleiev y a la periodicidad de las propiedades de los elementos químicos.

Empieza a ser posible estudiar de modo teórico no al átomo en el sentido abstracto del término, sino a los átomos perfectamente reales de los diferentes elementos químicos y, por medio de la experiencia, introducir algunos matices y precisiones en el modelo atómico de Bohr. Los experimentos sobre las emisiones de luz y sobre los rayos X permiten afinar la teoría. A esto se aplica Arnold Somerfeld, mientras sigue reconociendo la concepción general del átomo de Bohr. Sin embargo Bohr no está satisfecho. Los radios de sus órbitas no son el resultado de su teoría, sino fueron determinados por el espaciamiento de las rayas ópticas; es decir, fueron introducidos "desde afuera" mediante los resultados experimentales.[13] Él mismo está convencido de que su modelo no constituye más que una etapa en la búsqueda de la verdad.

La mecánica cuántica

Habrá que esperar siete años para que se inicie la etapa siguiente. Ésta comienza después de la guerra, cuando en 1924 el francés Louis de Broglie, joven físico en sus ratos de ocio, asegura en una tesis de 13 páginas escritas en un estilo bastante "filosófico" que la relación propuesta por Einstein en 1905 para la luz es válida para todas las partículas, en particular para el electrón. "El electrón, al que se consideraba más bien una partícula, es también una onda", afirma. Como el fotón de luz, la materia en estado microscópico posee extrañas propiedades: también es a la vez partícula y onda; y también intercambia energía sólo por paquetes, por cuantos.

En 1927, Davisson y Gerner realizarán franjas de interferencias con electrones, tan bellas como las obtenidas mediante la luz, y confirmarán así la hipótesis de De Broglie. Pero antes de verificarse esta brillante confirmación experimental, un frenesí se apoderó de un pequeño grupo de brillantes teóricos dispersos por toda Europa. Tres escuelas y cuatro enérgicas personalidades: Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli en Alemania, Paul Dirac en Cambridge y Erwin Schrödinger en Viena, quienes durante seis o siete años desarrollan en forma independiente[14] una nueva mecánica que permite representar el mundo microscó-

[13] En realidad, hizo corresponder el espaciamiento de las rayas espectrales observadas en laboratorio con el espaciamiento de niveles de energía de los átomos, y por lo tanto con los rayos de las órbitas en las que se desplazan los electrones; de este modo introducía los "números de cuantificación".

[14] Independientemente, pero frecuentándose mucho. Todos estos físicos de principios del

pico. Con este fin, Schrödinger utiliza una ecuación de propagación de ondas; Heisenberg y Pauli desarrollan un formalismo de matrices (tabla de doble entrada) que nadie entiende; en cuanto a Dirac, realiza un enfoque basado en operadores abstractos. Sin embargo, en 1927 todos constatan que lo que han hecho representa "la misma cosa" en formas matemáticas diferentes. Simultánea e independientemente, acaban de inventar la mecánica cuántica. Otros nombres prestigiosos se sumarán con sus trabajos a este cuarteto de vanguardia: Max Born, Pascal Jordan y, desde luego, el imprescindible Niels Bohr.

La idea básica es que los electrones son a la vez partículas —especies de minúsculas esferas de materia— y ondas; que estas partículas-ondas (u ondas-partículas) se comportan obedeciendo a los principios de los cuantos, es decir, que su energía varía de manera discontinua; y por último, que el comportamiento de esta partícula-onda no obedece a las reglas de la mecánica determinista sino a las del cálculo de probabilidades.

Nunca se sabe dónde se sitúa exactamente un electrón dado. Lo más que se puede hacer es calcular la probabilidad de su presencia en un lugar dado. Nunca se puede conocer *a la vez* la velocidad y la posición de una partícula. Si se conoce su posición con precisión, no se podrá precisar su velocidad, y viceversa: es el famoso principio de incertidumbre de Heisenberg. Por otro lado, dos electrones no pueden estar nunca en el mismo estado cuántico: sobre este principio de exclusión (mutua) de Pauli descansa el principio de arreglo ordenado de los electrones.

La base de esta "maquinaria" es una ecuación de propagación de ondas como las que se conocen en la física clásica, pero que aquí se aplica a esta "cosa extraña" que es la onda-partícula. Es la ecuación de Schrödinger (formulada por él en 1926). Con ayuda de esta "maquinaria matemática" no solamente se recuperarán los resultados del átomo de Bohr sino que además quedarán demostrados sin ninguna hipótesis *a priori*. Los niveles de energía de los átomos se explican como resultado del cálculo y no como números deducidos empíricamente de los espectros ópticos.[15]

A partir de ahí se podrá explicar mejor el átomo, su comportamiento, sus variaciones; es decir, la tabla de Mendeleiev: un éxito total.

siglo, poco numerosos, se encontraban en los grandes congresos, como los famosos Congresos Solvay o el que fue organizado en el lago Como en honor del 100 cumpleaños de Volta. Se escribían, se visitaban, y, desde luego, allí se formaban amistades y enemistades, muchas veces en medio de discusiones científicas.

[15] Al introducir el concepto de *spin*, es decir, de rotación del electrón sobre sí mismo, Dirac explicará incluso fenómenos complicados como la influencia de los campos magnéticos sobre los espectros luminosos o el efecto Zeeman.

No obstante, la interpretación física de la teoría cuántica desatará una polémica considerable en el seno mismo de la comunidad que la desarrolló. La dualidad onda-partícula, ¿corresponde a una realidad en el caso de los electrones? Schrödinger y De Broglie creen que las ondas tienen una existencia real. Einstein considera que se trata de un artificio de cálculo sin realidad física. Heinsenberg, Bohr y Born proponen la idea de que lo descrito por la mecánica cuántica es incomprensible en términos de la física ordinaria pero que sí corresponde a una realidad.

Para estos últimos, el mundo microscópico es radicalmente diferente del mundo sensible, al que califican de macroscópico. El electrón-onda se desplaza sin seguir las reglas simples de la mecánica, ni siquiera las perfeccionadas por Bohr para construir su modelo de átomo, sino obedeciendo a las leyes de probabilidades. Se habla de "probabilidad de presencia", de "principio de incertidumbre". No hay nada predecible, nada definido totalmente. La microfísica es esencialmente probabilística. Ésa será la base de lo que se denominará la "interpretación de Copenhague", ciudad donde residía Niels Bohr y punto de paso obligado para todo el que se interesara por la mecánica cuántica hasta 1950. En la física, esta visión representa una verdadera revolución, una ruptura con todo lo que se conocía hasta entonces.

Einstein, cuya ecuación para explicar el efecto fotoeléctrico había iniciado la revolución, se negará a seguir a sus colegas en este terreno. "Dios no juega a los dados", le diría a Max Born. Fiel al determinismo, no aceptará nunca la interpretación probabilística de Copenhague. Y sin embargo, a partir de una simple ecuación esta mecánica explica todo o casi todo: la estructura del átomo, los espectros luminosos emitidos por los átomos, la clasificación química de los átomos elaborada por Mendeleiev, los espectros de rayos x, etc. Es un modelo matemático elegante, construido a partir de conceptos revolucionarios, difíciles de asir mediante el sentido común.[16]

Estadística cuántica

Los electrones y los átomos son partículas que se encuentran en una inmensa cantidad en la naturaleza (recordemos una vez más que 12 gramos de carbono contienen $6\,023 \times 10^{23}$ átomos). ¿Por qué no aplicarles los métodos de la física estadística inventada por Boltzmann?

Ésa será la idea del italiano Fermi, de Dirac, de un joven físico indio

[16] La propagación de las ondas electromagnéticas, como la luz o las ondas de radio, sin soporte material, sin medio que vibre, tampoco es un concepto fácil de comprender.

entonces desconocido —Bose— y del inevitable y omnipresente Albert Einstein. Pero aún falta modificar las reglas de Boltzmann, introduciendo en ellas los principios de los cuantos. Así se creará en 1924 un método de estudio de los sistemas físicos sumamente eficaz y al que le espera un futuro promisorio: la estadística cuántica. Ésta quedará completa dos años más tarde con otra estadística, debida a Fermi y Dirac.

Las partículas se clasificarán finalmente según su comportamiento: por un lado están las partículas "sensatas", disciplinadas, "bien educadas", que obedecen al principio de exclusión de Pauli y a las que se denominará fermiones (derivación de Fermi), y por el otro las partículas "salvajes", anárquicas, indisciplinadas, que no respetan nada y pueden encontrarse en gran número en el mismo estado cuántico, denominadas bosones (llamados así por Bose).[17] Esta distinción fermiones-bosones tendrá un papel fundamental en el desarrollo de la física moderna, en especial en lo relativo al estudio de la estructura del núcleo, pero también de fenómenos como la supraconductividad o la superfluidez del helio líquido.

Relatividad

El recorrido de la teoría de la relatividad es más simple. En su "forma" llamada relatividad restringida, fue propuesta por Einstein en 1905 en un artículo fundador,[18] pero entonces pasó casi inadvertida. Cuando se otorga a Einstein el premio Nobel por su interpretación del efecto fotoeléctrico, ni siquiera se la menciona. Y sin embargo, fue en ese artículo donde propuso la célebre fórmula $E = mc^2$, es decir, la equivalencia entre masa y energía, que es el principio básico de toda la energía atómica.[19]

Einstein parte de una observación sorprendente: en el mundo físico,

[17] La estadística de Bose-Einstein fue desarrollada antes de que se conociera el principio de exclusión de Pauli, pero utilizando las ideas de los cuantos de Planck, Einstein y Bohr. La estadística de Fermi y Dirac utiliza, po rel contrario, la mecánica cuántica y el principo de exclusión de Pauli, recién propuestos.

[18] De hecho, Lorentz había abierto el camino con su famosa transformación y se tiende a pensar que Henri Poincaré había llegado a las mismas conclusiones en su ponencia en la Exposición universal de Saint-Louis.

[19] No deja de tener interés señalar que en 1905 Albert Einstein, ese "empleado" en la oficina de patentes de Berna, ex estudiante promedio de la Escuela Politécnica de Zurich y totalmente desconocido en el medio científico, publicó simultáneamente un artículo sobre la interpetación del efecto fotoeléctrico que será la base de la mecánica cuántica, un artículo sobre la relatividad restringida y un tercero sobre el movimiento browniano, que tendrá consecuencias importantes en la física estadística.

la velocidad es un concepto relativo, que sólo se define con respecto a un punto de referencia; pero la velocidad de la luz es un concepto absoluto e independiente de cualquier punto de referencia, como lo demuestra el experimento de Michelson.

A partir de ahí, Einstein desarrolla su teoría, que al igual que la mecánica cuántica, desafía nuestro sentido común. El aspecto más novedoso de esta teoría es que en ella el tiempo tiene el mismo nivel que las coordenadas del espacio, y como ellas, la medida del tiempo, es decir, la duración, es relativa. Esto se ilustra con el famoso viaje de Langevin: cuando dos gemelos, uno que ha viajado por el espacio y otro que ha permanecido en la Tierra, se vuelven a encontrar años más tarde, ¡tienen edades diferentes!

Naturalmente, todo esto sólo es válido en el caso de velocidades cercanas a la de la luz. En nuestra vida cotidiana, la mecánica relativista no ejerce ninguna influencia.

En cuanto sale del cerebro de Einstein, esta relatividad será incorporada a la gran síntesis cuántica. Paul Dirac, el "inglés cuántico", fue el primero en realizar esa integración. Así se construirá la grandiosa síntesis que desde entonces se conocerá como física cuántica relativista.

La relatividad general que propone Einstein (en 1915-1916) es más que una "extensión" de la relatividad restringida.[20] Es una nueva teoría, mucho más abstracta y que "geometriza" la gravedad, curva el espacio y propone una nueva manera de ver las relaciones entre la luz y la masa.

La confirmación de esta teoría un tanto extraña a los ojos del profano (aunque también para los físicos de la época) la proporcionará un cuáquero inglés que se niega obstinadamente a participar en la guerra de 1914-1918. Como era astrónomo real, un cargo prestigioso y muy visible, no es posible encarcelarlo en la Torre de Londres. ¿Cómo tratar entonces a este famoso "objetor de conciencia", Arthur Eddington, uno de los más grandes astrónomos del siglo? Tras varias discusiones y negociaciones, el científico convence al almirantazgo de que lo envíe en misión a la isla de la Ascención, en pleno océano Atlántico. La idea de Eddington es aprovechar un eclipse total de sol previsto en 1919 para probar la relatividad general. Y, en efecto, verificará que el Sol desvía la luz emitida por una estrella lejana, confirmando así las predicciones de la relatividad general.

Dichoso, Einstein le escribirá a su madre para comunicarle su satisfacción: por fin, gracias a Eddington, él mismo podrá creer en su teoría.

[20] Aunque lo incluya de manera formal.

Durante cincuenta años la teoría cuántica y la relatividad servirán como marco para explicar, prever, inducir y demostrar los progresos de la física de lo infinitamente pequeño y de lo infinitamente grande sin sufrir ningún fracaso importante.

Después del átomo aislado y sus emisiones de radiaciones electromagnéticas, se podrá trabajar en el átomo *enlazado:* enlazado a uno o a varios átomos para formar moléculas; enlazado a miles de millones de otros átomos de manera regular y rígida, como en los sólidos cristalinos. Después de los electrones periféricos, los esfuerzos se concentrarán en el núcleo, en su composición, su estructura y su estabilidad.

Poco a poco, la teoría cuántica brindará una teoría "explicativa" del mundo microscópico tan elegante y abstracta como las teorías de la física clásica, como el electromagnetismo de Maxwell. Igualmente, la Relatividad desembocará en las ideas del Universo en expansión, de la historia del Universo, y estará en el origen de la "teoría de moda" del Big-Bang.

Esta extraordinaria aventura fascinará con justa razón a los físicos y, en menor medida, a los matemáticos, y reforzará la falsa visión de la ciencia que nos legó el siglo XIX.

Esta visión es la de una ciencia que, en su etapa adulta, está formada por un corpus matemático compacto, completo y que, a partir de éste, se desarrolla valiéndose de un procedimiento deductivo. La presentación didáctica que gradualmente se hará de la mecánica cuántica y de la relatividad ocasionará que algunos olviden que toda esta aventura surgió gracias a un constante vaivén entre experiencia y teoría, mente y realidad, modelo y naturaleza.

Este fuego artificial de la física del primer cuarto de siglo eclipsará en buena medida el futuro de las demás ciencias.

La Química y los cuantos

La química, la verdadera ciencia organizada en torno a conceptos unificadores, nació junto con el siglo. Siguiendo a distancia los progresos de la física y su exploración del mundo microscópico, las concepciones de Dalton sobre la existencia de los átomos se impondrán de manera espectacular...[21] un siglo más tarde. Cuarenta años después del Congreso de Karlsruhe, todo lo que se había propuesto en él quedará aceptado: la materia está constituida por conjuntos de átomos; cuando estos conjuntos están formados por unos cuantos átomos se

[21] Retrospectivamante, el libro de Jean Perrin, *Les Atomes*, que apareció en 1912, es un parteaguas. En torno al concepto de átomo, anuncia la fundación de la fisicoquímica.

habla de moléculas; cuando están formados por miles de millones de átomos y se encuentran en estado sólido se habla de cristales; el agua en estado líquido está formada por moléculas con la notación H_2O (dos átomos de hidrógeno por uno de oxígeno); el metano CH_4 (un átomo de carbono por cuatro de hidrógeno) también está formado por moléculas; el cuarzo SiO_2 o la sal de grano NaCl son cristales.

De acuerdo con esta lógica atómica, cada elemento químico está definido por la estructura de su átomo particular. Así, en la clasificación periódica de Mendeleiev, los diversos tipos de átomo se ordenan según su complejidad cada vez mayor, por adiciones sucesivas de electrones. El átomo de hidrógeno posee un electrón; el de helio, dos; el de litio, tres y así sucesivamente hasta llegar al uranio, que posee 92. Como cada átomo es eléctricamente neutro, cada vez que hay un electrón adicional debe haber un protón adicional, pero como el protón es muy pesado, aporta consigo una masa importante (a la que se agrega la masa de los neutrones).[22] En resumen, a medida que la estructura del átomo se vuelve más compleja, aumenta su masa. La del átomo de hidrógeno (un protón más un electrón) es de uno, la del uranio de 238 (92 electrones, 92 protones y 146 neutrones).

De ahí proviene actualmente la periodicidad puesta en evidencia por Mendeleiev. La mecánica cuántica lo explica con ayuda del principio de exclusión de Pauli. Para los electrones del átomo se definen niveles de energía en los que éstos pueden encontrarse. Sin embargo, en cada nivel sólo puede haber cierto número de electrones. Así, en el nivel externo sólo puede haber ocho. Cuando hay un electrón adicional se debe pasar a un nivel de energía superior. El principio de Pauli prohíbe la anarquía cuántica, y los electrones son como fermiones muy "sensatos". De ahí la periodicidad de ocho en la clasificación de los elementos químicos.

Valencia

Mientras que la mecánica cuántica sólo permea lentamente la química, el químico estadunidense Lewis clarificará un concepto hasta entonces oscuro: la valencia, es decir, el número de enlaces que puede establecer un átomo con otros átomos. El hidrógeno tiene una valencia de uno, el oxígeno de dos, el carbono, más sociable, de cuatro. Así se explican las fórmulas antes citadas: un átomo de oxígeno se enlaza a dos átomos de hidrógeno para formar la molécula del agua (H_2O), etcétera.

[22] El neutrón fue descubierto por Chadwick en 1932. Regresaremos a la estructura del núcleo en el capítulo VI.

Con éstas formulas, la química habla por fin su propio idioma, prohibido treinta años antes por el sueco Berzelius. Dicho lenguaje no surgió ni de las matemáticas ni de alguna lengua en particular, sino que utiliza combinaciones del alfabeto para formar símbolos y, junto con éstos, describe a los constituyentes del compuesto: HCl (ácido clorhidríco, un compuesto de hidrógeno y cloro), CH_4 (ácido carbónico: un átomo de carbono rodeado de cuatro átomos de hidrógeno), etc. Como consecuencia de la vieja propuesta de Le Bel y Van't Hoff, de quel el átomo de carbono figura en el centro de un tetraedro, las fórmulas químicas empiezan a desarrollarse como estructuras espaciales. Este lenguaje químico se convierte al mismo tiempo en una forma de expresión, un modo de representación y una guía de pensamiento. Tal vez los jeroglifos no eran, después de todo, una lengua tan arcaica...

Gracias a algunos pioneros como Linus Pauling, de quien volveremos a hablar, la química se monta en la ola cuántica. ¿Los físicos explican la tabla de Mendeleiev mediante la mecánica cuántica? Pues los químicos de inmediato le sacarán provecho, pero irán mucho más lejos al ampliar y generalizar esos principios. Después de los átomos de los cuerpos simples, sus asociaciones revelarán todos sus secretos.

Los enlaces entre átomos se realizan gracias a los electrones. Estos electrones "de enlace" ya no pertenecen propiamente a uno u otro átomo, sino al conjunto, a la nueva entidad química. Esta molécula nueva no es la suma de dos o más átomos, sino una entidad original, dotada de propiedades exclusivas. Esto ya se sabía en el plano químico, pero en el microscópico es igualmente cierto. Los niveles moleculares de energía se definen igual que los niveles atómicos. Las moléculas emiten o absorben luz según las reglas cuánticas. Estas "luces moleculares" servirán más tarde para estudiar las propias moléculas, la naturaleza de sus enlaces, su solidez, su forma: en suma, la estructura y la naturaleza moleculares.

Después de Berzelius, el joven sueco Svante Arrhenius prosigue el análisis del comportamiento de las sustancias disueltas e inventa la teoría de los iones en solución.[23] Este trabajo se le rechaza como tesis y tiene que redactar otra tesis. No obstante, años más tarde recibirá el premio Nobel precisamente por su trabajo. Así sucede con la ciencia (¡por fortuna!) y con los jurados (¡por desgracia!).

A pesar de estos progresos teóricos, la química sigue siendo ante todo una disciplina experimental cuyos progresos se realizan en el la-

[23] La teoría de los iones en solución postula que las sustancias están disueltas en el agua en forma de iones, es decir, de átomos cargados (por ejemplo, iones de sodio, Na o cloro, Cl). A partir de allí se definen los ácidos, que liberan iones H (ej.: HCl) y las bases, que liberan iones OH (ej.: NaOH). Esta teoría es la base de toda la química de las soluciones acuosas.

boratorio, a lo "rudimentario", antes de trasladarse a los reactores industriales. La química es más que nunca una disciplina industrial, cuyo liderazgo mundial ostenta Alemania.

Sólo después de la segunda Guerra Mundial terminará su revolución y los conceptos cuánticos impregnarán las prácticas del químico de laboratorio.[24] En la primera mitad del siglo, sigue siendo una disciplina a medio camino entre la ciencia y la cocina, no muy diferente de la de fines del siglo XIX.

La Sismología

Las ciencias de la Tierra lograrán a principios de nuestro siglo dos descubrimientos esenciales y discretos que llevarán a una renovación completa de esta disciplina. Por desgracia, el primero quedó ahogado por el ruido de la revolución cuántica, y el otro quedó sepultado por la "estupidez" de los geólogos de la época.

El primero es el descubrimiento de la estructura interna del planeta. En 1883, el inglés Milne, en un viaje a Japón para estudiar los temblores de tierra, había predicho que las vibraciones producidas por esos acontecimientos debían "oírse" en todo el planeta.

En 1889, el caballero alemán Von Reuber Paschwitz confirma esta predicción realizando experimentos con ayuda de un péndulo: observa que su péndulo acaba de sufrir una brusca perturbación inusual; al buscar la causa de este incidente se acuerda del trabajo de Milne y se percata de que unas horas antes se ha producido un violento sismo en Japón. ¿Y no es éste el tiempo que necesitan las vibraciones para recorrer la distancia entre Japón y Prusia? La sismología moderna acaba de nacer.

En unos años, los ingleses Milne y Oldham, del servicio geológico de la India, y el alemán Wiechert, inventarán y construirán sismógrafos (aparatos para registrar las vibraciones producidas por los sismos) e instalarán en todo el planeta una red de estaciones para registrar sistemáticamente los sismos. Descubrirán así la lógica de la propagación de las ondas sísmicas a través del planeta y a partir de ella determinarán la estructura de la Tierra.

El sismo se convierte para ellos en un emisor de ondas, y el sismógrafo es un medio de registrarlas. De acuerdo con la "lógica" de la propagación, se podrán determinar las velocidades de propagación y, por lo tanto, definir límites, discontinuidades. Oldham establece que la es-

[24] Incluso en los años 1957-1960, cuando estaba haciendo mis estudios, las explicaciones cuánticas sólo se utilizaban en uno de cada dos cursos de química. Había que tomar cursos de fisicoquímica para aprender la química cuántica.

tructura interna de la Tierra está formada por capas concéntricas: en el centro, el núcleo, con un radio de 3 500 km; alrededor de éste, un manto de 2 900 km de espesor; finalmente, en la superficie, coronando el manto y en posición de interface con las capas fluidas superficiales, una delgada película: la corteza terrestre, que según el yugoslavo Mohorovicic alcanza un espesor de 30 km (lo que, comparado con los 6 400 km del radio de la Tierra, no es nada).

Los sismólogos demuestran también que si se cuenta al menos con tres estaciones para el registro de las vibraciones telúricas, se puede determinar con precisión la localización de un sismo (su foco).

Estos resultados se obtienen sin necesidad de recurrir a matemáticas complicadas, únicamente a partir de un sentido agudo de la física y de un diálogo constante entre observaciones y modelos.

Deriva de los continentes

El segundo descubrimiento cuya importancia pasa inadvertida se debe al meteorólogo alemán Alfred Wegener, quien en 1910 propone la revolucionaria idea de que los continentes se separaron entre sí en el curso de la historia geológica. De este modo, América del Sur y África formaban inicialmente un solo bloque, en el que la "protuberancia" de Brasil "llenaba" el golfo de Guinea. Su separación habría dado origen al océano Atlántico del Sur. Llevando más lejos sus reconstrucciones, Wegener sugiere que en el Pérmico (-250 millones de años), los continentes estaban unidos en un inmenso bloque, el "continente de Gondwana", y que sólo después se separaron, Australia hacia el este y América hacia el oeste. Para apoyar su tesis recopila argumentos de diversos orígenes: comparaciones entre la naturaleza del terreno, la de los fósiles, etcétera.

Su teoría, que como sabemos hoy, era básicamente correcta, es rechazada casi por la totalidad de la comunidad científica de su época. Tanto geólogos como geofísicos (Argand, Du Toit, B. Choubert, Runcorn y Holmes) rechazan la deriva de los continentes. Harold Jeffreys, una de las grandes "glorias" de la naciente sismología, afirma incluso haber demostrado matemáticamente la imposibilidad de dicha deriva,[25] tal como Berthelot aseguró haber "demostrado" lo absurdo de la hipótesis atómica.

La geología, poco sensible a este descubrimiento, seguirá pues con su actividad clasificadora y sistemática y permanecerá fragmentada en

[25] Lo creerá hasta su muerte, a la edad de 92 años, en 1992.

tres campos: la petrografía (ciencia de las rocas), la estratigrafía (ciencia de los estratos, es decir, el estudio de las épocas geológicas, con la que está estrechamente ligada la paleontología) y la tectónica (estudio de la estructura de las montañas). La geofísica, que cobra nuevo interés con Oldham y Milne, sigue estando totalmente aislada de la geología, dado que, mientras el geofísico estudia toda la Tierra y su estructura, el geólogo sólo estudia la corteza terrestre, convencido de que el comportamiento de ésta reproduce en buena medida el de las capas más profundas.

De este modo, las ciencias de la Tierra permanecen fragmentadas en dos disciplinas distintas: geología y geofísica; la primera orientada hacia la descripción pura y la otra hacia las matemáticas abstractas, pero ambas mutuamente indiferentes.[26] Desde luego, las investigaciones con las minas y el carbón siguen obedeciendo a los métodos tradicionales de la geología de campo (cartografía, estratigrafía), bastante eficaces después de todo.[27] Los ingleses se mostrarán muy hábiles en este terreno y sus colonias figurarán entre los principales distritos mineros del mundo (África del Sur, Australia, Canadá).

Sin embargo, este inicio del siglo XX también será testigo del arranque de la explotación petrolera, desarrollo en el que el papel de las ciencias geológicas será bastante insignificante. Ciertamente, los nuevos industriales tratarán de racionalizar sus métodos de prospección y así nacerán la geofísica aplicada y la geología petrolera. Pero viendo hacia atrás, es necesario reconocer que hasta los años ochenta esas disciplinas desempeñaban un papel bastante modesto en el descubrimiento de yacimientos. Durante mucho tiempo el petróleo se descubrirá basándose en consideraciones generales y en la suerte,[28] y los pozos se establecerán siguiendo criterios que hoy nos parecen irrisorios.[29]

En compensación, la idea de que la geología podía servir para encontrar petróleo da un gran impulso a esta disciplina. Se puede decir que en este periodo fue el petróleo el que ayudó a la geología y no a la inversa.

[26] Esta situación prevalecía aún en los años sesenta, particularmente en Francia.

[27] La lógica de los métodos geológicos es simple: una capa gelógica que recubre otra es la más joven de las dos, un pliegue que afecta a estratos es posterior a su edad de depósito, una falla que recorta una serie estratigráfica es posterior a ésta, etc. Son mucho más difíciles de aplicar en la práctica, pues suponen una gran agudeza de observación en el terreno, y el dominio de sus combinaciones.

[28] Así sucedió con el yacimiento argelino de Hassi Messaoud, descubierto gracias a la última perforación, llamada "de abandono", lo que hizo decir a algunos que si se hubiera actuado de acuerdo con el azar, sin recurrir a los geólogos, se habría descubierto el yacimiento tres años antes.

[29] Esto ya no es válido en la actualidad, porque el petróleo se busca y se encuentra racionalmente. Por ello hay demasiado y los precios han bajado.

La biología moderna en germen

Marc Bloch decía que la historia se lee al revés. Si adoptamos este punto de vista es indudable que en el inicio del siglo estaba latente la mutación biológica de la segunda parte, aun cuando la época no lo percibiera así.

La biología estaba entonces fragmentada en disciplinas que se ignoraban mutamente. Para hablar en términos políticos, la biología era entonces una confederación, ni siquiera una federación y mucho menos una nación. ¿Qué tienen en común un botánico ocupado en clasificar plantas o en comprender el misterioso fenómeno mediante el cual se transforma el gas carbónico en carbono orgánico con ayuda del Sol, y un fisiólogo heredero de Claude Bernard que intenta profundizar en el concepto de regulación del medio interno?

¿Qué tienen en común el entomólogo maravillado por la extraordinaria diversidad del mundo de los insectos y que trata de poner en evidencia sus filiaciones, y el bioquímico dedicado al análisis de los carbohidratos del tejido humano?

Cada cual realiza su tarea sin conocer bien su objetivo, o más bien aceptando que dicho objetivo está limitado, definido por sus preocupaciones inmediatas. Pero nadie se ocupa de la vida en el sentido general del término.

A pesar de esta compartimentación, verán la luz dos conceptos que resultarán centrales: el de gen y el de enzima y, asociado a este último, el de proteína.

Genética

La genética como disciplina autónoma nació con el siglo. Treinta años después de sus trabajos fundadores, Mendel es redescubierto, y sus leyes matemáticas, probabilísticas, que a sus contemporáneos les habían parecido incongruentes, se convierten en referencias. Al relacionar estas leyes con la naturaleza celular de la materia viva, aceptada desde entonces, se empieza a pensar que los portadores de la herencia deben hallarse en el nivel de las células. Weismann logra un progreso decisivo al identificar el núcleo de la célula como el portador de la herencia celular. Retomando la idea del "factor hereditario" de Mendel, Johannsen habla del *gene,* unidad elemental de la herencia. Con ayuda de los progresos técnicos en la utilización del microscopio y de los cortes histológicos, se identificará dentro de los núcleos celulares a los cromosomas (bastoncillos que pueden teñirse, del griego *chromos,*

color): los verdaderos portadores de la herencia. Este descubrimiento permite profundizar en la visión de Weismann. Se estudia el comportamiento de los cromosomas; los investigadores los cuentan, los siguen durante su reproducción y finalmente llegan a la conclusión de que estos bastoncillos flexibles son precisamente los portadores de los genes alineados en su interior. El cromosoma se manifiesta desde entonces como una estructura universal presente en todos los seres vivos y portadora de los genes, y se empieza a describir a éstos. Se establece así el vínculo entre constitución celular y genética. Weismann distingue en el ser vivo lo que corresponde al *soma*, aparente, mas perecedero, y lo que pertenece al *germen*, que puede transmitirse a las generaciones futuras. Las modificaciones del soma no son transmisibles de generación en generación; esta afirmación echa por tierra la idea recurrente de la herencia de los caracteres adquiridos, grata a Lamarck.

Por otro lado, Hugo de Vries, en Holanda, afirma que la evolución no es un proceso gradual, sino continuo, progresivo, que procede por saltos, por discontinuidades bruscas, y llama *mutaciones* a esas discontinuidades en la evolución. La teoría de Darwin encuentra entonces una explicación: son estas mutaciones las que modifican a las especies. La selección natural, la lucha por la vida o por la reproducción sólo "conserva" las mutaciones que le resultan provechosas. Utilizando la mosca del vinagre, la drosofila, que presenta la particularidad de reproducirse a gran velocidad, Morgan produce en el laboratorio esas famosas mutaciones y muestra que son imprevisibles, aleatorias. Las modificaciones del germen son fenómenos que obedecen a las leyes del azar. La teoría de Lamarck ha quedado definitivamente enterrada.[30]

Así, a principios de siglo, los conceptos de evolución de las especies, reproducción de los individuos o estudio de las células vivas comienzan a incorporarse en el ámbito de esta ciencia nueva y apasionante que llevará el nombre de genética.

Bioquímica

El otro gran avance de este periodo es de orden bioquímico. Los químicos de la materia viva se dividen entonces en dos clases.

[30] Según Lamarck, la jirafa tenía el cuello largo porque al querer alcanzar las hojas de los árboles lo estiraba hacia arriba; de generación en generación, al sumarse los alargamientos, se había llegado a ese resultado. Lamarck explicaba también la extraordinaria adaptación de los animales a su medio. No obstante, la experiencia invalida esta teoría, como lo demostró Weismann. Si se le corta la cola a una población de ratones, sus descendientes nacen con cola, lo cual puede repetirse durante varias generaciones con idéntico resultado.

Por un lado los analistas, como Liebig, que tratan de elaborar el catálogo de todas las moléculas que integran la materia viva. Con ayuda de los progresos de la química fundamental se hace posible, sobre todo después de 1915, descifrar algunos elementos de esas complejas estructuras que son las moléculas, constituyentes de la materia viva. Habrá que esperar todavía unos treinta años para que los rayos x permitan la determinación detallada en tres dimensiones de estas estructuras. Sin embargo, poco a poco se hace evidente que todos los seres vivos, ya sean plantas o animales, vertebrados o invertebrados, contienen los mismos tipos de compuestos. Pronto se los clasificará en tres grupos: glúcidos, lípidos y prótidos. Así, a través de su diversidad comienza a manifestarse la unidad química de lo vivo.

La otra categoría de los químico-biólogos se interesa sobre todo por las reacciones químicas, las transformaciones que se producen dentro de los cuerpos vivos. Esta tendencia no es nueva: con esa intención Lavoisier ya había mostrado que la respiración es una "combustión" que permite quemar la materia viva para recuperar energía y que expulsa al producto de dicha combustión: el bióxido de carbono. Igualmente, Pasteur había estudiado ya las fermentaciones aunque sin comprender su mecanismo exacto. Fue Buchner quien realizó, 50 años después, el experimento fundamental: de un jugo de levadura extrajo toda materia viva, toda célula, y con ayuda de ese líquido reprodujo la fermentación. De este modo descubre que no son los seres vivos sino unas sustancias extraídas de éstos las que permiten las reacciones de fermentación. Entonces se descubrirán decenas de estas sustancias "mágicas": algunas atacan a las grasas y favorecen su disolución; otras permiten atacar los azúcares. Muy pronto se comprueba que esas sustancias presentan una curiosa propiedad: hacen posible la reacción química pero no participan en ella. O, mejor dicho, se mantienen intactas, regeneradas, hasta el fin de la reacción. Estas sustancias pertenecen así a la categoría de los catalizadores, de los "creadores de reacciones". Por lo que respecta a las reacciones biológicas, se les llama *enzimas* (las "enzimas glotonas" de la publicidad de detergentes son las que permiten disolver las grasas y facilitar el lavado de la ropa). Poco a poco, el estudio de estas sustancias cautivará a los bioquímicos, quienes descubrirán que si bien algunas favorecen la degradación, otras favorecen la síntesis. Se trata de constituyentes universales y determinantes de la actividad química de la materia viva.

Este descubrimiento trae consigo una revolución. Por primera vez se comprende lo que tiene de específico el mundo vivo: no se trata de ninguna "fuerza vital", de ningún principio oculto, mágico, que viole las leyes de la termodinámica. La novedad es la presencia de enzimas que facilitan y aceleran algunas reacciones químicas, totalmente espe-

cífica. Estas enzimas son una de las claves esenciales para nuestra comprensión de la materia viva.

Veremos cómo los estudios más recientes no han hecho sino confirmar en lo esencial este punto de vista. Pero si bien estos distintos enfoques contribuyeron a la comprensión de las disciplinas biológicas, puede decirse que la biología siguió estando muy compartimentada. Y es que, como sucede a menudo en el desarrollo científico, cuando empieza a surgir un nuevo campo se convierte en disciplina, y ésta tiende de inmediato a aislarse para afirmarse. Así sucedió con la genética y la bioquímca, tal como había ocurrido antes con la fisiología y la biología celular.

Como acabamos de ver en este capítulo, el inicio del siglo XX fue testigo de un desarrollo científico completamente dominado por la revolución de la microfísica y el conocimiento de los átomos. No obstante, los progresos realizados en las demás ciencias serán los que contengan el germen de la gran revolución de fines del siglo que constituye el objetivo principal del presente libro.

III. 0, 1... Y EL INFINITO

SI PENSAMOS en la importancia relativa de los diversos descubrimientos, encontramos una innovación que predomina en todas las ciencias de la segunda mitad del siglo XX: la computadora. La computadora-objeto, la computadora-sujeto. Es a la vez resultado de la investigación e impulsora de investigaciones; indicador de una revolución científica, de una mutación tecnológica y de una transformación sociocultural.

Ninguna de las grandes revoluciones científicas de la segunda mitad del siglo podría siquiera haberse concebido sin la computadora: ni la exploración espacial, área donde las naves teledirigidas y la recopilación de datos dependen directamente de ella; ni la exploración de lo infinitamente diminuto en los aceleradores de partículas; ni el descubrimiento del lejano infinito con los telescopios ópticos o de radio, ni la ciencia del caos, que habría permanecido como mera curiosidad en las obras de Poincaré; ni la biología moderna, en donde la computadora se ha vuelto el auxiliar indispensable para establecer la secuencia de los genomas y almacenar los códigos genéticos, sin dejar de mencionar los rastreadores *[scanners]* para observar la Tierra o el cuerpo humano, o los medios modernos de análisis químico. En el dominio de la ciencia nada escapa a la influencia de la computadora, que lo ha transformado todo, ha vuelto posible lo impensable, fácil y rápido lo fastidioso; hasta en las matemáticas ha provocado directa o indirectamente desarrollos inesperados.

Sin embargo, la revolución de la computadora no fue el descubrimiento casual de algún inventor genial, ni consecuencia de principios científicos novedosos, sino el resultado de una combinación de múltiples factores, dentro de los cuales destacan, sin duda, los vinculados principalmente con la tecnología y el comercio.

EL CÓDIGO BINARIO

Todo comienza con la numeración binaria. Una numeración con dos cifras, en la cual si bien el 1 se escribe como 1, el 2 en cambio se escribe como 10, el 3 se escribe como 11, el 4 se escribe como 100. Se requieren cuatro cifras para escribir 8 (1 000), 14 para escribir 9 000 (10 001 100 101 000), y así sucesivamente. Este sistema es muy engorroso en términos de "cifras". Ahora bien, en una máquina diseñada

para realizar operaciones hay que almacenar estos números. ("Pongo 2 y me quedan 3..."). En código binario se requiere, por lo tanto, de máquinas con una capacidad de almacenamiento enorme, lo cual a primera vista puede parecer un sistema pesado y poco manejable. Las tablas de multiplicación son, por el contrario, verdaderamente sencillas. Se reducen a estas:

$$0 \times 0 = 0$$
$$0 \times 1 = 0$$
$$1 \times 1 = 1$$

¡El sueño de muchos estudiantes!

El lenguaje binario ha sido por mucho tiempo prerrogativa de algunos matemáticos; el común de los mortales prefiere el cálculo que usa la base diez, más económico en cuanto a cifras y que permite usar los dedos para contar. ¿Cómo pudo imponerse el binario como el lenguaje universal de las computadoras, siendo tan engorroso?

Su predominio —todavía no puede hablarse de triunfo— se debe a la electricidad. En un circuito la corriente pasa o no pasa. Un interruptor sólo tiene dos opciones "sí" o "no", abierto o cerrado, 1 o 0. A partir de que se decidió realizar de manera automatizada las operaciones con la ayuda de máquinas electrónicas, se pensó naturalmente en el código binario. Parece que antes de la segunda Guerra Mundial el francés Couffinal fue uno de los primeros en tener esta idea. Pero muy pronto lo pesado de las manipulaciones y el tamaño de los números que en ellas se manejan se convirtieron en graves obstáculos.

¿NUMÉRICO O ANALÓGICO?

Ello explica por qué, paralelamente a la aparición de las máquinas basadas en el uso del código binario, salieron a la luz toda una serie de máquinas que parecían *a priori* más flexibles, menos pesadas y más poderosas. Estas máquinas utilizaban al máximo las posibilidades de los diversos circuitos que la naciente electrónica había permitido desarrollar tanto para la radio como para el teléfono. Eran calculadoras análogas a los circuitos electrónicos, y se les llamó "analógicas" debido a que funcionaban siguiendo el principio de analogía con la electricidad. Lejos de verse limitadas por el código binario, utilizaban toda la flexibilidad de las señales electrónicas[1] para simular tal o cual tipo de cálculo. Se trataba de una especie de tratamiento gráfico: se genera-

[1] Son las curvas gráficas que aparecen en la pantalla del osciloscopio de laboratorio.

ban curvas, que se agregaban o se sustraían o se ensamblaban. También era posible simular fenómenos complejos traduciéndolos en curvas complicadas. El inconveniente de estas calculadoras residía en que se especializaban en cierto tipo de problemas únicamente. Cada máquina manejaba una familia de gráficas, es decir, un tipo de problemas. Además, no eran muy precisas, pues resulta difícil fijar y medir corrientes eléctricas con pequeñas fluctuaciones.

A mediados de los años cincuenta, las exposiciones didácticas sobre las computadoras se dividían en dos bandos: las máquinas numéricas y las máquinas analógicas. Unas y otras contaban con partidarios y el resultado de la competencia estaba lejos de despejarse, aun cuando en la actualidad nadie declararía *a priori* haber dudado en ese entonces del resultado. Entonces estaba bien visto declarar que cada tipo de máquina, en su terreno, era superior a la otra. Pocos años después, sin embargo, las numéricas se llevarían la victoria absoluta, sin concesión ni discusión, llegando incluso a sustituir a las analógicas en el sector en el que éstas habían ejercido su poder durante treinta años: las telecomunicaciones.

¿Cuál fue la causa de ese triunfo? No fue la invención de un nuevo procedimiento, ni la puesta en práctica de un nuevo principio, ni la demostración de algún teorema fulgurante. Fue una causa doble: tecnológica en primer lugar y comercial en segundo.

Para entender mejor la importancia de estos factores, veamos el desarrollo histórico y en primer término la génesis de las computadoras.

Historia de la computadora

La historia de la computadora es materia difícil y ha dado lugar a diversas "falsificaciones". Se suele presentar al matemático John Von Neumann como el padre de la computadora. Esto es a todas luces inexacto, pero no es casual y ha tenido algunas consecuencias.

En realidad, la computadora es ante todo fruto del trabajo de los ingenieros. La ayuda de los matemáticos, aunque importante, no fue sino posterior. La contribución de Von Neumann es considerable, pero debe ser reubicada en su contexto. Fueron ingenieros quienes fabricaron las primeras máquinas calculadoras mecánicas y después electromecánicas: uno de ellos se llama Vannevar Bush, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), quien pone en funcionamiento en 1913 su calculadora mecánica; en el periodo que antecede a la segunda Guerra Mundial, Zuse en Alemania, Couffinal en Francia y Stibitz y Aiken en Estados Unidos, conciben y desarrollan calculadoras

electromecánicas basadas desde entonces en el código binario. Por la misma época, desconocido por todos y alejado de las grandes firmas industriales, John Atanassof inventa la primera *computadora* verdadera con base en la electrónica. Su computadora ya es binaria y cuenta también con todos los elementos básicos de la computadora moderna: memoria, compilador, procesador. Este trabajo pionero va a pasar "inadvertido" y sin embargo será copiado y plagiado durante treinta años. No es sino después de un sonado juicio industrial cuando se le hará justicia a Atanassof.[2]

La guerra estalla. Los militares se dan cuenta de los servicios que les podrían prestar las computadoras, sea para dirigir los tiros de artillería, sea para almacenar las informaciones obtenidas gracias al espionaje o para ayudar a los científicos del "Proyecto Manhattan" a fabricar la bomba atómica. En los centros militares secretos y en las universidades se intensifica la investigación.

El famoso Turing[3] construye en Inglaterra una computadora conocida con el nombre de "Colossus". Un prototipo es puesto en marcha en Los Álamos y otro en el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Pensilvania. Estos esfuerzos no fructifican realmente sino hasta después de la guerra, con la construcción del ENIAC (Computador e Integrador Numérico Electrónico), efectuada por John Mauchly y Prosper Eckert, a quienes va a unirse John von Neumann. Fueron estos tres hombres quienes construyeron el ENIAC 2, el verdadero precursor de la computadora moderna.[4]

Ahora bien, la asociación de estos tres hombres es simbólica: ingenieros para concebir y fabricar la máquina y un matemático para desarrollar los programas. Pero sin ingenieros, sin electrónica, ¡no hay computadora! Desde su creación, las computadoras son el fruto de los progresos realizados por la tecnología. Ésta seguirá siendo la regla: la computadora progresará al ritmo del progreso de la electrónica, hasta el día en que sea ella quien guíe e imponga el ritmo.

[2] La demanda fue levantada por la sociedad Sperry Rand, quien acusaba a Honeywell de haber plagiado el trabajo de Atanassof. Honeywell presentó las pruebas de que en realidad Sperry Rand era quien había copiado desvergonzadamente a Atannassof. Se exhumó del olvido el trabajo de este último, quien fue citado como testigo del juicio que marcó su rehabilitación científica.

[3] Turing se suicidará masticando una manzana envenenada al saber que la justicia inglesa lo había condenado, por homosexualidad, ¡a ser esterilizado! No obstante, su computador *"Colossus"* había brindado un inmenso servicio a los países aliados, ya que había permitido "descifrar" el código secreto alemán durante la segunda Guerra Mundial.

[4] ENIAC ya había sido utilizada en el proyecto Manhattan.

Transistor

La primera revolución de la electrónica tiene por nombre y símbolo "Transistor", siglas de *transfer resistor*. Este pequeño objeto tecnológico vendrá a transformar la electrónica... y nuestra vida cotidiana.

La electrónica tradicional se basaba en el bulbo triódico.[5] Recordemos que los voluminosos receptores de radio de nuestros padres estaban repletos de ellos. Los circuitos electrónicos estaban compuestos por conjuntos de bulbos ensamblados y vinculados por hilos eléctricos, organizados éstos también en circuitos. Todo el aparato resultaba voluminoso, consumía mucha electricidad y desprendía buena cantidad de calor.

Con el transistor, estos defectos desaparecieron. Ese pequeño cubo "mágico" de silicio remplaza al bulbo y de inmediato los circuitos eléctricos disminuyen de tamaño, consumen menos corriente, despiden menos calor. Los aparatos de radio pronto caben en la mano.

¿En qué reside el poder del transistor? ¿Qué propiedad extraordinaria posee?

El transistor es uno de los frutos de la física del estado sólido, sobre la cual hablaremos más tarde y que se desarrolló poco después de la última guerra mundial. Fue descubierto en 1948 por tres físicos estadunidenses, John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley. Pero hubo que esperar hasta el periodo que va de 1955 a 1960 para que se convirtiera en un componente industrial básico.

Como lo había establecido Faraday, los materiales pueden dividirse en conductores y aislantes: aquellos que dejan pasar la corriente y aquellos que impiden su paso. El cobre es conductor, el vidrio y el aluminio son aislantes. Sin embargo, en los años cuarenta se descubrió la existencia de materiales "intermedios", a los que se bautizó como semiconductores. Normalmente son aislantes, pero cuando contienen algunas impurezas pueden conducir la electricidad si se cumplen ciertas condiciones. El silicio cristalino es el arquetipo del material semiconductor. Según las impurezas que se le añadan, puede convertirse en semi-conductor N (negativo) o P (positivo). Será semiconductor N cuando la impureza posea más electrones externos que el silicio (cuatro). Será semiconductor P cuando la impureza posea un número de electrones externos inferior a cuatro.

El transistor consiste en un microensamble de tres placas, PNP o NPN, un *sandwich* de distintos semiconductores cuyas propiedades

[5] Descendiente de los tubos de vacío, que habían desempeñado un papel muy importante en la comprensión de la naturaleza de la electricidad en el siglo XIX y principios del XX.

resultan sorprendentes. Según las condiciones, puede amplificar una corriente —empleo que se le da en la electrónica normal—, o bien dejar pasar o no la corriente: esta segunda posibilidad binaria va a permitir su amplia utilización en las computadoras. Cuando el voltaje se encuentra entre dos valores dados, el transistor se comporta como un conductor y deja pasar la corriente; fuera de esta ventana es un aislante por abajo y por arriba que sólo deja pasar la corriente cuando está constituido de silicio puro. Dicho de otra manera, tiene la valiosa propiedad de funcionar como todo o nada, como una puerta abierta o cerrada. Resulta entonces comprensible el nombre de semiconductor, que explica a su vez el de *transfer resistor* (reducido a "transistor") que se dio al *sandwich* compuesto por estos materiales.[6]

Al asociar de manera adecuada varios transistores, se podrán efectuar funciones lógicas elementales tales como *Y*, o *NO Y*, u *O*, etc. Así, por ejemplo, *Y*, al recibir dos proposiciones, verdadera (corriente 1) o falsa (corriente 0), forma como salida la corriente 1 (verdadera) si las dos entradas son idénticas y (0) si las dos entradas son diferentes. Se puede también establecer la tabla de verdad *O*; cuando la corriente pasa, si uno de los dos valores es (1), la tabla de verdad se escribe (0), etcétera.

Y

	0	1
0	1	0
1	0	1

O

	0	1
	1	0
1	0	1
1	1	1

En una primera etapa, el transistor remplaza al bulbo en los circuitos electrónicos, donde los transistores y las asociaciones de transistores se encuentran vinculados por hilos eléctricos. Sin embargo, esta arquitectura se ve rápidamente superada. En 1952, el ingeniero inglés Dummer señala que, con el uso de las propiedades de los semiconductores y de los transistores, se pueden asociar estos últimos sin la ayuda de los hilos eléctricos, mediante el diseño de ensamblados de materiales aislantes, donde conductores y semiconductores constituyen un

[6] Recomiendo sobre este tema el librito de Michel Camus, *12 clés pour l'électronique: entretiens*, París, Berlín, 1986.

solo bloque. Esta idea la concretará en 1959 Jack Kilby, quien en su paso por Texas Instruments fabricará el primer circuito integrado. Como se trata de un ensamblado de minúsculas porciones de silicio, se les llamará "*chips*" (trocitos) o "*microchips*".

Computadoras

A partir de este descubrimiento y de sus aplicaciones va a comenzar la revolución electrónica, que llegará poco a poco al mundo de la computadora. Al transistor se le va a unir la memoria magnética, cuya inmensa capacidad permitirá almacenar series de 1 y de 0, leerlas, reconstituirlas, transportarlas, sumarlas y multiplicarlas. Los transistores y las memorias magnéticas permitirán transformar en forma radical lo que se llama la arquitectura de las computadoras.[7] Es la época en que surge la informática y se construyen computadoras cada vez más grandes y poderosas. Asistimos al surgimiento de las grandes compañías de informática. La primera generación de computadoras comerciales saldrá a luz con la UNIVAC 1 en 1950; se trata de una calculadora electrónica de bulbos. Le sigue en 1953 la IBM 701. En 1956, IBM domina el mercado ampliamente. La primera computadora que utiliza los transistores y que por ende es más compacta aparece en 1959.

Pero la innovación tecnológica no se detendrá ahí. La aparición de los circuitos integrados, en los que estarán vinculados en una pequeña tableta de un centímetro cuadrado 100 000 y muy pronto un millón de transistores, y posteriormente la utilización de los transistores en la fabricación de memorias van a contribuir al nacimiento de una nueva generación de aparatos. La miniaturización de los componentes desemboca en seguida en la de las computadoras. A la época del gigantismo va a seguir la de las "minis", en la cual las compañías Hewlett Packard y Digital van a desempeñar papel importante, para llegar después a la época de las "micro". Lo pequeño es bello.

"Como siempre, el negocio"

IBM se negaba a creerlo. Fue Apple la que provocó la explosión del mercado con su célebre microcomputadora Macintosh, equipada con ratón y pantalla de televisión. Estamos ante la irrupción de la informática en la oficina, el laboratorio y hasta en el hogar.

[7] Las memorias magnéticas constan de toros magnéticos ensamblados de manera rectangular. Las líneas y las columnas de la red permiten orientar el toro magnético.

Toda esta evolución tecnológica no hace más que reforzar e imponer el sistema binario. La razón es simple: si se fabrica un componente electrónico de diez posiciones, es decir, que corresponda con la numeración decimal, hay que fabricarlo con una precisión extrema ya que un error del 10% podría cambiar un 8 por un 9, un 2 por un 3, etc. Por el contrario, basta una precisión mediana si se fabrica un componente binario, pues lo que se propone es distinguir sí o no, 0 o 1. Los componentes electrónicos de fabricación "bastante rústica" son más que suficientes. Un componente de este tipo presenta una ventaja enorme: es sencillo, resulta barato producirlo. Pero, por otra parte, se requiere fabricar un número mucho más grande que si se usara un código de base diez. ¿Cuál es la solución menos costosa, muchos componentes baratos o menos componentes más caros? Se puede demostrar fácilmente que la primera solución es la más económica. Menor costo y, además, menores riesgos de error. Confiable y barato: es la divisa de lo binario. Resuelto el problema del volumen necesario para manejar las largas series de 1 y 0, sólo quedan las ventajas de usar el lenguaje binario y sus reglas de adición y multiplicación que, como ya vimos, son muy sencillas. Una vez que deja de plantearse el problema de la voluminosidad, la sencillez de lo binario se impone sin resistencia. Se abren entonces todas las posibilidades en la concepción, arquitectura y tamaño de la computadora.

IBM, "la *Big Blue*", como se le llamó, no creyó en la computadora personal. Tampoco va a creer en las computadoras paralelas e incluso llegará con retraso a la carrera de las megacomputadoras. Pero, ¿qué son las computadoras paralelas?

Paralelismo

En la concepción clásica de la computadora, las operaciones se efectúan una tras otra, en secuencia, exactamente de la misma manera en que nosotros efectuamos un cálculo. Es verdad que dejamos los resultados parciales en la memoria y vamos a buscarlos cuando es necesario, pero la máquina procede paso a paso, una operación tras otra. En el cálculo paralelo, la máquina realiza de forma paralela y simultánea varias operaciones en varios lugares y no se ocupa en hacerlas coincidir más que cada cierto tiempo, cuando lo considera necesario. De ello resulta una gran economía en el tiempo de cálculo, lo cual aumenta la capacidad de cálculo.

Para ilustrar esta diferencia, tomemos el ejemplo de la reconstrucción de una imagen. Para reconstruirla, primero se divide la imagen en una trama o ensamble de pequeños cuadros elementales (o *pixeles*, derivación de *picture elements*). Conviene desde luego asegurarse de la

coherencia en las fronteras de estos cuadros elementales. Representa el problema del intercambio de información entre los procesos y de la optimización de este intercambio; si este proceso se maneja bien, el cómputo se volverá seguramente mucho más rápido.

De modo que, en el caso de las grandes computadoras, las arquitecturas "paralelas" le ganan el paso a las "secuenciales", para llegar a lo que en la actualidad se llama los supercomputadoras "masivamente paralelas". En virtud del progreso tecnológico que permitió la fabricación de componentes cada vez más pequeños y cada vez más confiables, la construcción de grandes computadoras se orientó hacia el aumento de tamaño por homotecia; después, en un segundo momento, la preocupación se orientó con mayor sagacidad hacia la arquitectura. ¿Y si efectuáramos los cálculos *de otra manera?* Así nacieron las calculadoras vectoriales, después las paralelas, más tarde las "masivamente paralelas" de nuestros días.

De lo micro a lo nano

Del lado de los "pequeños", el cambio más notable fue en el tamaño: cada vez más poderosos en el cálculo, cada vez menores en volumen. Después de la aparición de los mini, de los microprocesadores y de los *chips*, los circuitos integrados contienen ahora una cantidad de transistores asociados en formas tan variadas que ellos mismos se constituyen en "nanocomputadores". Estos *chips* del tamaño de un microcubo invaden y revolucionan los objetos de la vida cotidiana.

El funcionamiento de un auto BMW depende en la actualidad de tantas instrucciones informáticas como ¡el viaje del *Apolo* que llevó a Armstrong a la Luna en 1969! Una Macintosh del grosor de un portafolio contiene hoy día la potencia de cálculo de la IBM más grande de 1965.

El progreso alcanzado por las computadoras en 15 años resulta verdaderamente extraordinario (¡la potencia y la rapidez se duplican cada tres años!) y se desconoce dónde se detendrá, sea en el caso de los computadores gigantes, sea en el de las computadoras microscópicas. La era del silicio apenas comienza; se desconocen sus límites, su potencia y su duración.

Rapidez y calor

La velocidad de la luz, aunque parezca gigantesca a nuestros ojos, constituye ahora el límite de la velocidad de transmisión de las órde-

nes. Cabe reducir aun tanto las distancias que recorren merced a la miniaturización, como el tiempo necesario para realizar una operación elemental.

Para transmitir la información a la velocidad de la luz y aumentar el ritmo de cálculo sin distorsiones ni errores, el uso de la fibra óptica y del láser no tiene competidores. Por esta razón se habla de la "optrónica", que quizás será la tecnología del futuro.

Asimismo se desearía aumentar el poder y el número de elementos susceptibles de ser ensamblados. En esta área, la limitación reside en la capacidad de evaluar el calor que irradiarían los contactos eléctricos de millones de millones de operaciones. La ventilación de las computadoras, su rapidez, su confiabilidad serán mañana fundamentales, como en otra escala lo fueron hace 20 años los circuitos de bulbos. Deshacerse del calor, y rápidamente, será una de las grandes exigencias a las máquinas del futuro.

Se desconoce de qué manera la tecnología y el ingenio del hombre enfrentarán estas nuevas fronteras. Toda la aventura de las computadoras ha dependido de su capacidad de crear e inventar sin seguir una lógica preestablecida. La aventura de la informática no se parece en nada al avance inexorable que sigue la lógica platónica; más bien constituye una revolución tecnológica sujeta al azar y a lo imprevisto.

Lenguajes

En lo sucesivo, la cuestión radica en saber de qué modo dominará el hombre la escritura de los programas cada vez más grandes y complejos que necesitarán las nuevas máquinas. Pues en la aventura de las computadoras, lo que se llama *software*, es decir, el lenguaje informático y su programación, ha sido tan indispensable como el desarrollo de las máquinas o *hardware*. En realidad, su desarrollo ha sido simbiótico, el uno ha permitido el desarrollo del otro y viceversa. En ciertas etapas, las nuevas máquinas han vuelto obsoleto el *software*; se han tenido que escribir otros nuevos. En otros casos, se han construido nuevas máquinas de acuerdo con las ideas inspiradas por los principios de lenguajes y programas novedosos. En resumen, uno y otro siempre han evolucionado conjuntamente. Es en este terreno donde se ha requerido en ocasiones la asistencia de matemáticos.

En los inicios de la informática, el precio de las máquinas era elevado, mientras que el del *software* era bastante barato. La mayoría de los usuarios escribían ellos mismos sus programas. La tarea de los usuarios de la informática se concentraba en la programación. Más tarde, gra-

cias a la mayor complejidad de las máquinas, el *software* se convirtió en asunto de especialistas. Los usuarios se contentan con poner a funcionar los programas ya escritos, extenderlos, unirlos, ensamblarlos. Se ponen a jugar Meccano con los programas. En esto rigen también las consideraciones económicas: cuando un programador escribe un código comete en promedio un error o una falla por cada doscientas líneas. Un código común y corriente, que contiene entre un millón y diez millones de signos, contendrá entonces entre cinco mil y cincuenta mil errores cuando se escribe su primera codificación. Es necesario, por supuesto, detectar esos errores, corregirlos y probarlos. Esto implica un costo enorme en términos de trabajo calificado. Asimismo, cuando un programa es confiable, se va a recortar, se va a ensamblar con otros, se va a combinar. La mayoría de los programas que existen son sólo combinaciones de programas existentes y escritos para otros fines, por lo cual resultan en general mal adaptados, pesados, muy extensos y a menudo monstruosos. Del mismo modo, cuando aparece tal o cual máquina, los diseñadores se lanzan periódicamente a la reescritura de programas. Esto se traduce por lo general en una reducción del número de líneas con un factor de 10 a 100. Pero es rara esta operación de limpieza general, ya que resulta costosa por implicar un trabajo intensivo. Todo ello explica que el precio de dichos programas, conocidos con el nombre genérico de "paquetes", no haya dejado de aumentar, mientras que el del *hardware* se reduce cada vez más. Compañías enteras, como la Microsoft, han hecho fortunas vendiendo sólo *software*. No resulta absurdo imaginar que un día se regalarán las computadoras y se venderá sólo el *software*, como hacen algunos comerciantes de armas que previamente regalan los cañones para después vender las cargas.

El *software* se ha vuelto tan importante que ahora se busca programar máquinas que generen programas automáticamente. Al mismo tiempo, el desarrollo del *software* creó una nueva disciplina científica: la lógica de los lenguajes informáticos. Esta disciplina es un tipo de lingüística formal que busca esclarecer las reglas de la escritura del *software*.

Lo más apasionante de esta disciplina es la búsqueda de reglas que permitan indirectamente producir nuevas arquitecturas para las computadoras. También son apasionadamente las investigaciones encaminadas a la escritura de *software* de manera automática, lo que conduciría a concebir máquinas que se autoprogramarían. Esto se encuentra todavía dentro del campo de los sueños, pero ya se fabrican máquinas que traducen de una escritura a otra, es decir, que adaptan a su arquitectura las instrucciones escritas para otras máquinas con arquitecturas diferentes.

Lógica de lo imprevisto

Se fabrican ya máquinas que saben leer, que pueden descifrar una escritura matemática, que entienden instrucciones dadas con la voz, que traducen de un idioma a otro. ¿Por qué no creer que algún día podrían fabricarse máquinas autoprogramables? Esta revolución de las computadoras, que se desconoce cuándo terminará o en dónde acabará, hizo polvo todos los esquemas epistemológicos construidos pacientemente después de los griegos. Su desarrollo no se parece en nada a los esquemas que han prefigurado los grandes capítulos del desarrollo de la física del siglo XIX.

La computadora no es el resultado del descubrimiento de leyes de la naturaleza, es un artefacto producto del cerebro humano. En este sentido es prima hermana de las matemáticas. Se diferencia de éstas en que no es un objeto mental, sino real. A pesar de ser prima de las matemáticas, la ciencia de las computadoras se ha desarrollado sin ellas, uniendo tecnología y combinatoria sin teoremas ni fórmulas complejas.

La computadora es así el primer gran éxito de la combinatoria, o mejor dicho, de lo inesperado de la combinatoria. Combinatoria en la asociación de los transistores. Combinatoria de los *chips* y de los circuitos. Combinatoria en la concepción de las arquitecturas. Sin embargo, eta combinatoria no es ni sistemática ni automática. Una computadora es un conjunto complejo de elementos simples que obedecen reglas muy diversas.

La otra peculiaridad de la ciencia de las computadoras es que con ella se invirtió el orden lógico del siglo XIX entre la ciencia y sus aplicaciones. No puede decirse que la computadora sea una aplicación de la ciencia. Si bien es cierto que el transistor es una repercusión de la física de los sólidos, la computadora con sus propiedades globales y originales no es un producto de la ciencia. Más bien nos encontramos ante una ciencia creada por un producto.

Una ciencia que transmite un mensaje de extrema importancia: el poder de la combinatoria. Unidades elementales simples combinadas en forma apropiada, terminan por crear un mundo complejo de una variedad infinita. Con el binomio 0 y 1 se ha creado un infinito.

Soñemos un poco: la computadora permite en la actualidad solucionar problemas de cálculo que doscientas generaciones de matemáticos no habían podido lograr. Comienza a emplearse para sustituir a las matemáticas en numerosos enfoques cuantitativos. No está preescrito el papel de aquéllas en la ciencia del futuro. ¿Se seguirá recurriendo a

las matemáticas para hacer cálculos? A partir de la aparición de las "calculadoras manuales" ya no se enseña a obtener la raíz cuadrada, ni a recurrir a la tabla de logaritmos. ¿Se continuarán enseñando el día de mañana las sutilezas en la construcción de curvas o el cálculo de complejas integrales? Así, la computadora nos lleva a revisar el papel de las matemáticas como auxiliares en las ciencias.

Por otra parte, la computadora modifica también las condiciones de trabajo de quienes observan y de quienes experimentan. En la actualidad, se efectúan mediciones valiéndose de las computadoras y se realizan algunas operaciones automáticamente, gracias a la computadora. ¿Hasta dónde se llegará en este aspecto? Más aún, la computadora permite combinar comportamientos complejos que llegan a sustituir la experimentación. La experimentación numérica es ahora una forma novedosa de explorar la naturaleza. Además, lo mismo que la experimentación, también ella genera lo imprevisible.

La computadora resulta definitivamente un "producto" que trastoca muchas de las tradiciones de la ciencia, ¡y lo hace de una manera casi exógena!

IV. LA DOBLE HÉLICE

HACE 42 AÑOS, James Watson, Francis Crick y Maurice Wilkins publicaron en la revista británica *Nature* el modelo de la estructura en doble hélice del ADN.[1] Con este descubrimiento se inició el extraordinario desarrollo de la biología moderna.

ADN

La ciencia de la herencia biológica, que había nacido en 1866[2] con los ingeniosos experimentos del monje y botánico austriaco Gregorio Mendel, encontraba por fin su base estructural: los cromosomas están constituidos por cadenas de ADN[3], y los genes portadores de la herencia, hasta ese momento conceptos teóricos, son segmentos de esas inmensas moléculas de ADN. Una cadena de ADN está constituida por una sucesión de lo que se denomina nucleótidos. Un nucleótido es la unión de tres partes de azúcar, un fosfato y una base. Todos los nucleótidos tienen la misma configuración, pero la naturaleza de las bases cambia. Éstas son de cuatro tipos, que llamaremos aquí A.T.C.G. El código genético se encuentra entonces escrito en un alfabeto de cuatro letras, A. T. C. G. Al unirse en secuencias ordenadas como las frases de un texto, constituyen lo que se llama el mensaje genético, el libro donde queda inscrita la receta de reproducción de cada una de las especies. Además, la lengua de esta escritura, es decir, las palabras y la sintaxis, es común a todos los seres vivos. Si la longitud del ADN cambia, el mensaje también cambia, pero su código es idéntico y su fundamento queda igual: "El plan de fabricación de un elefante es más largo y complicado que el de una bacteria, pero los dos están escritos en una misma lengua y sobre un mismo papel, lo cual revela su parentesco original". Este descubrimiento dejó asentado de manera irrefutable el origen único de los seres vivos y, por ende, las bases mismas de la teoría de la evolución de las especies.

[1] Léase el fascinante relato del descubrimiento de James Watson en *La Double Hélice*, París, Laffont, 1984.

[2] 1866 es la fecha de publicación del único artículo de Mendel en los informes de la Sociedad de Ciencias Naturales de Brno.

[3] Ácido desoxirribonucleico. El primer científico que comprendió que el material genético era el ADN y no las proteínas fue Oswald Avery, quien falleció en 1955.

[T] La adenina (A), la timina (T), la citosina (C) y la guanina (G) forman las bases del ADN.

En determinadas circunstancias, la doble hélice llega a dividirse en dos. Las dos hélices están unidas entre sí por los vínculos muy laxos que se establecen entre las bases de los nucleótidos. Estos vínculos pueden "romperse", descomponiendo incluso la molécula de ADN en sus dos cadenas constituyentes, en cuyo caso cada hélice puede reconstituir su complemento —lo que sucede durante la división celular, base del crecimiento de los seres vivos—, o bien puede vincularse con otra hélice que provenga de otro individuo; esto es lo que sucede en el caso de la reproducción sexuada (véase más adelante).

Como es posible que ocurran accidentes químicos durante estos procesos, por ejemplo, que algunos átomos sean remplazados por otros o que una molécula sea sustituida por otra, resulta fácil entender cómo se producen las famosas mutaciones que permiten pasar de una especie viva a otra. Si el ADN se modifica, también se modifica el plan de producción de los nuevos individuos. De este modo, no sólo se fortalece la teoría de la evolución en virtud del código genético único, que implica un origen único, sino que se encuentra al mismo tiempo la explicación de cómo funciona. Se trata de una selección natural, de una elección entre las mutaciones. *Una elección entre las posibilidades*[4] ¿Cómo sorprenderse de que el gran biólogo inglés Peter Medawar haya visto el "mayor logro científico del siglo"[5] en el descubrimiento de la doble hélice del ADN?

Sin embargo, ése no era más que el principio. Faltaba comprender todavía el mensaje preciso que llevaba el código, cuál era su lenguaje y cómo se traducía ese código para producir los complejos mecanismos que son los seres vivos. A esta cibernética celular se le llamó "biología molecular", es decir, la biología estudiada y comprendida dentro del nivel molecular.

Reproducción celular

El comportamiento de la doble hélice va a resultar determinante en el momento en que una célula se divide para dar nacimiento a dos células, las cuales se dividirán a su vez en dos, y así sucesivamente, para dar paso a las miles de millones de células que constituirán un ser vivo. Cada célula normal (se les llama somáticas para distinguirlas de las células reproductivas, llamadas germinales) contiene dos moléculas de ADN. Cada molécula está compuesta de dos cadenas, de dos hélices. Cuando la célula se divide, cada molécula se parte y da lugar a dos pares de cadenas libres. Pero a su vez cada cadena, cuando se separa de

[4] *CF.* Jaques Monod, *Le Hasard et la Nécessité,* París, Le Seuil, 1973.
[5] Yo agregaría que junto con el transistor.

su complemento, lo vuelve a fabricar siguiendo una regla simple: A está siempre ligada a T y C lo está a G. Al final de la división celular cada hélice doble se desdobló y produjo dos moléculas de ADN. Así, las células hijas nuevas contendrán también dos moléculas de ADN, es decir, el libro donde se encuentra inscrita la manera de producir y reproducir en su totalidad al ser vivo.

Un ser vivo es una estructura sin parangón en el mundo mineral, pues en cada uno de sus componentes elementales, en cada una de sus células, se encuentra el mapa, sumamente complejo, gracias al cual se puede fabricar el todo, la estructura del ser vivo. Es como imaginar una montaña que encerrara en cada uno de sus minerales la descripción detallada, la carta geológica en tres dimensiones de la montaña en su totalidad.[6]

De hecho, el almacenamiento de la receta de fabricación en cada célula ocupa una longitud enorme. En el caso de la especie humana, en la cual la estructura biológica es muy compleja, la doble hélice de ADN de cada célula desenredada y extendida llegaría a medir varios metros. Puesto que cada ser humano contiene miles de millones de células, no resulta díficil calcular que todas las moléculas de ADN de un solo individuo, aisladas, separadas, extendidas y puestas una tras otra, ¡abarcarían una distancia superior a la que existe entre la Tierra y la Luna! Esto muestra que nos desgastamos mucho en multiplicar y conservar nuestros archivos individuales, y también que para mantenerse dentro de un cromosoma, las dobles hélices están muy plegadas y compactadas.

Reproducción

Cuando dos seres vivos se reproducen, la doble hélice desempeña un papel fundamental. Las células destinadas a la reproducción, los espermatozoides y los óvulos, llevan en su interior una sola hélice, una sola cadena de cada molécula de ADN y, al contrario de lo que sucede en la división de células ordinarias, las células sexuales no reproducen la hélice complementaria. En las células germinales, las dos hélices de ADN permanecen solteras, privadas de su complemento. De hecho, esas dos cadenas intercambian segmentos para producir dos cadenas híbridas en las cuales las sucesiones de nucleótidos provienen de dos moléculas de ADN originales. Durante la reproducción, la célula masculina se funde con la célula femenina, y es en entonces cuando las hélices masculinas se unen con las femeninas para formar dos hélices

[6] Sydney Brenner, entrevista en la *BBC*, 1993.

dobles. En este momento tiene lugar la alquimia de la reproducción sexuada, que elabora un nuevo libro de recetas donde se combinan la herencia del padre y de la madre; se constituye así la transmisión genética.

En esencia, esos resultados son válidos para todos los seres vivos, tanto para plantas y animales como para algas y bacterias. El número de moléculas de ADN depende de qué tan extenso o reducido sea el mensaje, pero la mecánica es la misma; en ello reside la unicidad del ser vivo.

Y claro está que también se aplica a la especie humana.

Al observar los mecanismos de reproducción en la especie humana a nivel molecular, resulta comprensible que no existan dos individuos con el mismo ADN.[7] Cada individuo, cada mujer o cada hombre es único, específico. El individuo se construye con el mismo modelo, su código genético tiene el mismo número de instrucciones, pero éstas varían de uno a otro. Todos somos diferentes, por lo cual resulta vano hablar de "raza pura", "raza superior", o cosas así. El racismo resulta sencillamente ridículo a nivel molecular.

Otro punto importante en el mecanismo molecular de reproducción lo constituye el error, la pequeña falla: que se inviertan dos nucleótidos, que un nucleótido remplace a otro, que falte un nucleótido, etc. Todos estos accidentes pueden provocar una mutación, y el que sucedan no resulta sorprendente: en miles de millones de procesos, cada uno de los cuales implica miles de millones de operaciones, un "error" es inevitable de vez en cuando. Es el fruto del azar químico. Así es como aparecen individuos "mutantes". En realidad no se debe hablar de errores, ya que las fluctuaciones, los "caprichos" en el proceso de reproducción molecular forman parte del proceso mismo. Se descubre que la tasa de "errores" podría ser específica de tal o cual genoma. En resumen, también la creatividad en la mutación está controlada, programada, de modo que la biología molecular que se inicia con Mendel comienza a esclarecer a Darwin.

Se puede decir que a partir de ahí todo comenzó. ¿Cómo pasar del libro de recetas, del ADN en el cual millones de instrucciones se encuentran grabadas, al individuo completo y terminado que llamamos adulto? ¿Cómo convertir el mensaje en realidad, el mensaje codificado en individuo concreto, completo y autónomo? ¿Cómo desencadenar esta impresionante maquinaria que en el hombre dura nueve meses y transforma una célula, un óvulo surgido de la fusión de dos células, en un sistema de una complejidad increíble?

[7] Excepto en el caso de los gemelos homocigóticos.

La fábrica molecular

Ya en los primeros estudios de la biología molecular, a los que con toda propiedad cabe considerar como pioneros en el área, se mostrarán los mecanismos sumamente sutiles del ADN. Éste no ordena de manera directa la producción de "órganos" o moléculas, sino que utiliza un intermediario, un mensajero llamado ARN,[8] que vuelve a copiar el mensaje genético y lo pasa después al organoide que actuará.

¿Qué significa actuar? Significa producir enzimas, producir proteínas cuyas propiedades "especiales" permiten la síntesis de tal o cual molécula.

En la materia viva se encuentran todos los elementos químicos necesarios para la fabricación de cualquier molécula: carbono, hidrógeno, nitrógeno, fósforo, oxígeno, azufre. Miles de millones de reacciones químicas son posibles; en realidad, todas las que se conocen en la química orgánica. De modo que, teóricamente, se podrían formar miles de millones de moléculas. De entre éstas, las enzimas eligen aquellas que se van a constituir por sí solas.

Estas moléculas de los seres vivos, que fueron elegidas y sintetizadas bajo la dirección de las enzimas, formarán las diversas unidades de la célula.

La química en la que las enzimas actúan como los catalizadores, es por lo tanto, muy selectiva. Cada enzima posee una función específica y el conjunto enzimático controla todo. En la fábrica bioquímica no puede producirse ninguna materia sin la intervención de las enzimas (las vitaminas y las hormonas son los ejemplos más conocidos). Las enzimas, que son proteínas desde el punto de vista químico, constituyen la clave del funcionamiento del ser vivo.

Es posible entonces observar la jerarquía que pasa del ADN al ARN, después a las proteínas y de ahí a la fabricación de la materia viva, secuencia que se repetirá y se modificará al infinito.

Los primeros biólogos moleculares se dieron a la tarea de descifrar el código genético con la idea de la correspondencia: un gene, una enzima. Sobre esa base se planteaba la pregunta de cuál era el código para pasar de uno a la otra. El mensaje del ADN se escribe con cuatro letras, cuatro nucleótidos. Las proteínas son cadenas largas formadas con 20 aminoácidos. ¿Cómo se pueden describir 20 objetos con un alfabeto de cuatro letras? Una combinatoria ingeniosa demostró que el medio más económico era el de formar palabras de tres letras. Con

[8] Ácido ribonucleico, que se parece mucho al ADN pero sólo contiene una hélice.

cuatro letras se pueden codificar los 20 aminoácidos. Cabe decir, pues, que el código genético está formado por una serie de frases escritas con palabras de tres letras, las cuales a su vez están formadas por un alfabeto de cuatro letras. Entre las frases existen, desde luego, silencios, puntos y comas. El secreto de la vida reside en la síntesis de proteínas, esas enzimas que poseen el monopolio para seleccionar las reacciones biológicas. El ADN y el ARN no son la excepción. Para fabricar el ADN, es decir, para reproducir una cadena a partir de otra, se requiere una enzima llamada polimerasa ADN. Para sintetizar el ARN se requiere también una enzima específica. La producción de tales enzimas, como la de cualquier otra enzima, está controlada por un gene, una parte del ADN. El ADN controla así su propia reproducción (llamada replicación en jerga biológica).

En los seres vivos cuyas células tienen núcleo, la mecánica de producción de proteínas (enzimas) se efectúa en lugares establecidos. El ADN se encuentra en el núcleo celular. Ahí se produce el ARN. Éste atraviesa la membrana celular y se fija en un pequeño organoide del citoplasma, el ribosoma. En el citoplasma se lleva a cabo la síntesis de las enzimas, una tras otra, como si el propio ribosoma, a su vez formado de enzimas, leyera una a una las frases del mensaje escrito en el ARN y ejecutara las instrucciones correspondientes. Es por ello que en un primer momento se pensó que para producir un ser vivo bastaba con saber sintetizar las enzimas fundamentales. Actualmente se sabe que el asunto es un poco más complicado. Regresaremos más tarde a ello.

Poco a poco la mecánica molecular ha venido revelando sus secretos; la lógica que regula las moléculas, las cuales se reconocen, se combinan, se reproducen, migran y se reúnen para formar los órganos. Del ADN parte la señal transmitida por el ARN que informa al ribosoma; a su vez, la enzima constituida va a iniciar la duplicación del ADN, la producción del ARN, la génesis de un tipo de molécula, etc. Estos procesos se describen en términos de código, transferencia de informaciones genéticas, retroalimentación; en síntesis, empleando un vocabulario reservado a los circuitos eléctricos o electrónicos. Ello se debe a que tanto en un caso como en el otro se trata de sistemas complejos en donde todo elemento interactúa con todo lo demás o con casi todo.

Esta descripción de la vida es el resultado de experimentos simples y sutiles integrados en construcciones teóricas, modelos en los que la abstracción y la lógica nada tienen que envidiar a las matemáticas o a la física teórica, aun cuando el aparato matemático en sí mismo sea muy simple. Sin embargo, tales modelos teóricos son maleables, plásticos, evolutivos, provisionales, se modifican en la medida en que los

experimentos lo van exigiendo. No se trata de cortapisas o trabas al progreso, sino de guías, de marcos conceptuales. Quienes las construyen aceptan el rigor dentro de lo provisional, lo cual caracteriza sin duda el verdadero progreso científico.

En el centro de este espectacular progreso se encuentra la bacteria, ser unicelular, ni animal ni vegetal, cuya simplicidad estructural permite el análisis "completo" de los mecanismos celulares. Una bacteria con papel protagónico es la que habita en nuestro tubo digestivo y que se llama *Escherichia coli.* La rapidez con que se reproduce, su fortaleza y la facilidad con que se cultiva son los motivos por los que fue elegida para realizar experimentos en el primer periodo de la biología molecular, junto con algunos virus que la infestan, llamados "fagocitos" —abreviatura cariñosa de "fagocitos bacteriales"—, en los cuales se destaca también su papel fundamental de detectores y operadores.

Científicos de primer orden son famosos en este campo. Ente ellos destacan James Watson, Francis Crick, Sydney Brenner, Jacques Monod, François Jacob y Joshua Lederberg. A uno tras otro los suecos les han entregado merecidamente el premio Nobel (salvo a Brenner, sin que se conozca la razón).

Este periodo, al cual, según el caso, se califica de "glorioso" o "heroico" para la biología molecular, tuvo una duración de unos quince años y casi cada mes trajo consigo un descubrimiento importante. Si bien en esta etapa se establecieron las bases de la biología molecular que convertirían a la biología en una de las ramas sustantivas de la ciencia contemporánea, no se trataba más que de un comienzo y nada permitía prever cómo se desarrollaría..., un desarrollo que fue también espectacular.

De la bacteria al elefante

En ese entonces se pensaba, en efecto, que el paso del conocimiento de la bacteria al de los seres multicelulares sería rápido. Puesto que la complejidad consistía en la adición de elementos simples, una vez que se comprendiera el funcionamiento elemental de la célula, el conocimiento de los seres pluricelulares se derivaría de manera bastante lógica. "Lo que es válido para la bacteria, es válido para el elefante", dijo Jacques Monod en un aforismo famoso.

El autor del aforismo sabía perfectamente bien que un mundo separaba la biología de la bacteria de la del elefante, pero deseaba destacar la unidad de la vida, por lo que quizás no ponderó la extensión del campo que quedaba por explorar.

No se había comprendido del todo, como lo expondrá Pierre

Chambon veinte años más tarde en su cátedra inaugural en el Collège de France, que lo que es válido para el elefante no lo es para la bacteria, y que la mecánica que lleva a producir un ser superior complejo con órganos de funciones múltiples, y células con estructuras y funciones diferentes, era mucho más difícil de comprender que descifrar el funcionamiento de la bacteria microscópica. No lo hemos logrado aún veinte años después y, sin embargo, ¡cuántos avances y descubrimientos extraordinarios ha habido en el transcurso!

Las cuestiones que había que resolver antes de transferir o extrapolar los resultados de la biología molecular a los organismos superiores eran en verdad impresionantes.

En el curso de la división celular se presenta un momento en el cual las células hijas ya no son idénticas a las células madres, sino de diversa naturaleza: una se convierte en una célula nerviosa, otra en una célula muscular, otra en una célula del tubo digestivo. ¿De qué manera se decide tal diferenciación? ¿Cómo saben las células de la existencia de otras células para combinarse, reunirse con ellas y producir entre ellas un tejido y después un órgano? ¿Cuál es el código preciso que determina la forma de un órgano, su textura interna? ¿De qué manera una estructura lineal, unidimensional como el ADN llega a determinar una serie de formas tridimensionales, de órganos acomodados unos dentro de otros? Y lo que es más, ¿de qué manera se combina todo ello con tanta precisión para producir un ser vivo, esa máquina que funciona como un todo? ¿Cómo se integra en un todo cada una de las células, de los órganos y de las funciones? ¿De qué manera esos miles de millones de fábricas celulares terminan por trabajar en conjunto para crear un sistema único que vive en forma coherente, en otras palabras, que recibe del exterior energía e información y que en respuesta produce materia viva, libera energía y se reproduce?

He aquí el verdadero reto de la biología del desarrollo y de la embriología moderna. Edelman llama a esto la topobiología.

Aunque también en este terreno nos encontramos muy lejos del objetivo, estamos progresando a pasos agigantados. Las investigaciones realizadas desde principios de siglo permitían ya conocer las etapas que a partir del óvulo fecundado conducían a la creación del embrión. Tales estudios eran descriptivos, y se fundaban en la observación de las modificaciones sucesivas en la forma y en la aparición de los órganos.

Más tarde, los avances en los métodos de observación de tejidos permitieron señalar las evoluciones correspondientes. En la actualidad se profundiza todavía un poco más en el nivel de organización al poner

la atención en la molécula, pero sobre todo y fundamentalmente al plantear la cuestión de la causalidad y el control. Es así como se ha podido señalar la existencia de las proteínas, cuyo papel consiste en inducir la aparición de tal o cual tipo de célula, o la cohesión entre las células, lo que les permite producir tal o cual tejido. Se ha podido demostrar que durante su desarrollo todas las células intercambian continuamente señales químicas, lo que les permite mantenerse informadas, como si el arquitecto mantuviera al conjunto de obreros permanentemente informados sobre el desarrollo de la construcción. Estos estudios ya no destacan sólo los mecanismos moleculares, sino las relaciones entre las proteínas, los portadores de señales y las estructuras de orden superior a las células. De lo que se trata es de comprender los determinismos de la mecánica celular y, a partir de ella, la embriología global.

Todo esto se encuentra determinado por el código genético mismo. Así, se ha podido observar que los genes llamados homeóticos controlan los fenómenos de diferenciación celular. En la drosofila, una mutación inducida en un gene homeótico hace que crezca una pata donde debía crecer una antena. Experimentos como los realizados por Nicole Le Douarin producen una especie de monstruos, entre pollo y pichón, con lo que queda establecida la existencia general de mecanismos iguales ubicados en las mismas zonas del ADN, que desembocan en resultados específicos en cada especie. Es fácil imaginar lo que se produce cuando una mutación modifica un gene homeótico. No sólo se trata entonces de una cuestión de moléculas constituidas, sino de la aparición o desaparición de un órgano.

Vemos que la biología molecular ya no se contenta con resolver cuestiones en el plano molecular, sino que pretende explicar las *transferencias de planos*, las relaciones entre las moléculas, la forma y la fisiología de los organismos. Por supuesto, junto con la pregunta fundamental para cada individuo: ¿qué corresponde a la herencia y qué al azar y al aprendizaje? Todos somos genéticamente diferentes, pero lo somos también por nuestra historia, una historia hecha de azar y de necesidad...

EVOLUCIÓN

La biología molecular está en vías de esclarecer otra gran área: la teoría de la evolución. Desde los primeros avances de la nueva ciencia ya se había comprendido el principio. Después se han dilucidado sus modalidades.

Primero se mostró la variación cuantitativa que existe entre los

códigos genéticos. Mientras que el genoma de la bacteria contiene sólo dos millones de nucleótidos, el del hongo contiene 20 millones, y el del hombre, de tres a cuatro mil millones...

Estas cifras sugieren la idea de una relación entre la longitud del genoma y la complejidad de un organismo. No obstante, en lo específico, en el interior de una misma ramificación, la relación resulta ser mucho más compleja. Por ejemplo, el hombre, con 3.5 mil millones de nucleótidos en su genoma, ¡no posee ni por asomo el genoma más largo de entre los mamíferos! La probabilidad de mutación (es decir, de un accidente químico durante una instrucción) durante los procesos de reproducción se ha estimado cercana a 10^{-9} al año. En el hombre esa probabilidad corresponde a tres accidentes moleculares posibles en un año, cifra ya considerable. Este pequeño cálculo muestra que se requiere mucho más que una simple mutación para dar paso al nacimiento de una nueva especie. Se requiere que dicha mutación sea importante y que se produzca además durante los fenómenos de reproducción, y por tanto, de aislamiento.[9] La probabilidad de creación de "defectos de reproducción" es más o menos igual para todos los seres vivos, lo cual es bastante comprensible si recordamos que se trata de un proceso puramente fisicoquímico. Sin embargo, no todas las especies evolucionan a la misma velocidad.[10]

Es aquí donde interviene el segundo mecanismo darwiniano: la selección natural. De acuerdo con las condiciones del medio en determinado periodo, la presión de la selección natural que se ejerce sobre un tipo de ser vivo resulta más o menos fuerte. Cuando las condiciones se vuelven difíciles, se seleccionarán ciertas mutaciones que, en consecuencia, se verán fortalecidas. Por el contrario, cuando la selección se debilita, la evolución será menos importante. Se entiende entonces por qué cuando ocurren cambios climáticos importantes aumenta la presión de la selección en ciertas especies y las modificaciones biológicas pueden resultar enormes.

Prospectiva

Mientras que la transición de la bacteria al elefante se veía con un optimismo exagerado durante los años setenta, se consideraban con cierto pesimismo las posibilidades de manipular libremente el ADN.

[9] Darwin había señalado ya la función del aislamiento, durante sus estudios de las islas Galápagos en su viaje a bordo del Beagle.

[10] Los estudios recientes se inclinan a matizar este punto, como ya señalamos, pero se trata de un refinamiento de orden secundario.

¿Cómo pensar que se podía modificar la secuencia de miles de millones de nucleótidos cuyas dimensiones son del orden del angstrom, Å (1 angstrom = 10^{-8}cm)? ¿Cómo crear un bisturí atómico? Aun en el caso de que la física nos proporcionara tal instrumento, ¿cómo modificar un mensaje en el que las palabras son conjuntos complejos de aminoácidos?

Veinte años después de la exploración del ADN, Jacques Monod, uno de los gigantes que se embarcaron en esta aventura, al hablar de las posibilidades de modificar los genes de manera artificial, escribió en 1970: "El nivel microscópico del genoma impide por el momento y sin duda por siempre tales manipulaciones...". Cinco años más tarde aparecían las primeras técnicas de manipulación genética. Estos dos ejemplos que no tienen nada de anecdóticos demuestran cuán difícil resulta extrapolar en el campo del desarrollo científico, y cómo los iniciadores de una disciplina pueden verse superados por su propia creación. Como lo señalaba el gran físico danés Niels Bohr, "en materia científica es difícil prever... ¡sobre todo el porvenir! La ciencia avanza a saltos, a zancadas, a veces, incluso, con retrocesos; la planeación científica no es más que una ilusión.

La manipulación molecular

Así la biología molecular no se detuvo en el nivel de la bacteria. Podríamos decir que al extenderse a los animales superiores, tuvo una explosión y permea ahora todas las investigaciones biológicas y médicas.[11] No viene al caso pasar revista a los abundantes progresos realizados en esta disciplina (y mucho menos describirlos). Debemos, sin embargo, señalar al lector las razones por las cuales resultaron inexactas las predicciones de los precursores.

En sentido contrario a lo que preveía Jacques Monod, en la manipulación del potencial genético, es decir del ADN, no se recurre a un bisturí físico ni a un láser supramolecular, ni siquiera a un microscopio de efecto túnel; se recurre esencialmente a técnicas biológicas. ¿Quiénes son los protagonistas?

En primer lugar, las enzimas, esas moléculas milagrosas que permiten o impiden tales o cuales reacciones bioquímicas. Algunas resultan verdaderas tijeras moleculares que cortan las largas cadenas del ADN en lugares muy precisos, como lo haría el escalpelo. Otras, por el con-

[11] En su excelente *Histoire de la Biologie moléculaire,* París, La Découvete, 1994, Michel Morange señala que existió un "vacío", una travesía en el desierto de 1965 a 1972, que se traduce de manera concreta en las dificultades que tuvieron que resolver los investigadores para pasar de las bacterias a los seres superiores.

trario, permiten las combinaciones y la unión de cadenas separadas de ADN. De manera que con esas tijeras y ese pegamento molecular se puede fabricar ADN casi "artificial", con diversas cadenas provenientes de orígenes diversos. Se le conoce como ADN "recombinante" (aunque más bien debería decirse recombinado).

El segundo agente de esta revolución son las bacterias, primas de los antepasados lejanos del hombre, a las cuales se les podría considerar más bien sus "mejores amigas". Con la ayuda de ciertos fagocitos, virus parásitos de las bacterias que se introducen en ellas horadando las membranas, la bacteria acepta y después acoge este ADN artificial que fue producido con las enzimas adhesivas y las enzimas tijeras. Acoger significa en este caso no sólo aceptarlos, sino también multiplicarlos junto con ellas ¡a un ritmo de una generación cada 20 minutos! Una bacteria constituye una verdadera fábrica de reproducción, la cual da nacimiento a ocho bacterias hijas por hora, es decir, ¡16 777 000 en 24 horas!

Cuando se produce un ADN "recombinante", se introduce en una bacteria, la cual reproduce el ADN, y se obtienen así miles de millones de ejemplares del nuevo ADN. Pero si este ADN contiene partes de ADN de elefante, ¿se observará a la bacteria multiplicarse y fabricar poco a poco un monstruo con rasgos elefantescos? Desde luego que no, pues entre la reproducción de una bacteria y la de un elefante se levanta una barrera colosal llamada diferenciación celular, es decir, el mecanismo por el cual las células se especializan y, en consecuencia, se diferencian. La bacteria posee un ADN no tan largo, un breve mensaje codificado lo suficientemente grande para almacenar las instrucciones que le permiten reproducirse en forma idéntica, pero ridículamente insuficiente para producir un elefante. ¡Es como si con el manual de instrucciones para fabricar una rueda de bicicleta se esperara poder construir un Ferrari injertándole encima un simple chasis!

¿Y si en lugar de elaborar una bacteria, elaboráramos el huevo de un ser superior? Si modificáramos su ADN, si le introdujéramos ADN recombinado de manera artificial, ¿qué sucedería? Eso que creíamos imposible es ya una realidad. Se manipula el genoma del ratón, de la drosofila, de diversos vegetales con propósitos de aplicaciones farmacéuticas y agronómicas. ¿Sería posible reproducir a los dinosaurios, como se hace en *Parque Jurásico*, trasplantando ADN fantásticos en huevos de cocodrilo? El sueño se vuelve cada vez menos absurdo, sobre todo ahora que se ha podido desarrollar el ADN de una avispa almacenada en ámbar con una edad de 40 millones de años (la diferencia con *Parque jurásico* es de sólo 30 millones de años), aunque en la actualidad no se puede sintetizar un animal superior a partir de un

animal inferior, ya que para fabricarlo se requiere mucho más que sólo ADN, ARN y ribosomas. Interviene también una maquinaria compleja cuyo determinismo aún es bastante desconocido. Se descubrió, por ejemplo, que en las sucesiones de nucleótidos que forman las largas cadenas de ADN de los seres superiores, los aminoácidos, que en apariencia no sirven para nada ni determinan nada ni controlan nada, son más numerosos que las asociaciones que tienen un significado claro. Como si en una novela, los puntos, las comas, los guiones y los paréntesis ocuparan un espacio tres veces mayor que las palabras. Llega uno a preguntarse: ¿y si esos puntos y esas comas fueran esenciales sin que hayamos llegado a comprender por qué?

Bioquímica

Todas esas manipulaciones genéticas (el término en sí es a la vez perturbador y culpabilizante) habrían alcanzado con rapidez sus límites si la biología no se hubiera beneficiado con la participación de dos disciplinas poderosas: la química y la informática.

La química brinda la posibilidad de producir *in vitro*, es decir, sin la participación de material vivo, las moléculas que intervienen en la maquinaria biológica. La replicación de una cadena de ADN por medios artificiales constituye sin duda el símbolo vigoroso de la intromisión de la química dedicada a la síntesis, llamada síntesis molecular, en la biología. Las consecuencias teóricas de este desarrollo son tan enormes como su uso práctico.

Hemos hecho hincapié en el debate que se suscitó entre los químicos del siglo XIX en torno a la idea de lo que es la vida. Unos pensaban que los seres vivos obedecían a leyes particulares, diferentes de las del mundo común, diferentes de las leyes de la física y de la química. Otros no creían para nada en eso. Según los primeros, las moléculas del ser vivo no podían sintetizarse en el laboratorio, pues sólo el ser vivo era capaz de producirlas. Para los segundos, todas las moléculas químicas podían *a priori* producirse en el laboratorio. Todo estaba en saber cómo hacerlo, es decir, en tener la receta.

Tal debate se había superado ya en los años cincuenta, cuando los químicos empezaron a sintetizar moléculas biológicas en el laboratorio. La síntesis de la gigantesca molécula B12 efectuada por Woodward fue quizás la etapa más determinante. Toda la farmacología se desarrolló a partir de ese hecho.

No obstante, la replicación del ADN efectuada por Kary Mullis en 1985 tiene otro significado. Se produce en el laboratorio el comple-

mento de una cadena de ADN. Es verdad que aún no se trata de la síntesis completa del ADN *in vitro*. Se toma el ADN de un ser vivo, se separan sus dos cadenas, y después, a partir de cada una de ellas se produce su complemento mediante las manipulaciones químicas apropiadas. A esto se le llamará "clonaje molecular sin célula" y se trata de una operación bioquímica. Si es colocada en condiciones apropiadas, cada cadena de ADN induce la síntesis de su complemento. En resumen, la cadena del ADN libre actúa por sí sola como una enzima. El ADN que así se fabrica es idéntico a un ADN natural, de manera que se puede cortar, hacer que produzca su complemento y todos los demás procesos. La técnica de Mullis constituye así un método de replicación de ADN *in vitro*, con lo que la idea de "fuerza vital" quedó totalmente pulverizada...

La siguiente etapa será la automatización de esa tecnología de clonación molecular, la cual permitirá producir a voluntad grandes cantidades de ADN.[12] A partir de ello será posible la duplicación en grandes cantidades y, en consecuencia, la decodificación de una cadena simple de ADN. Esto permitirá identificar tanto a una persona en la criminología policial como los árboles genealógicos de diferentes especies a partir de extractos del ADN de restos fósiles. Los químicos todavía no acaban de comprender totalmente la síntesis del ADN, pero al menos comprenden la manera en que a partir de un sustrato inicial es posible producir esa inmensa molécula hecha de miles de millones de átomos y de forma tan compleja. También han comprendido que mediante la combinación de la biología de los seres vivos y la técnica química es posible desarrollar técnicas industriales de gran eficacia.

Ésa es una etapa sin duda fundamental para comprender los mecanismos bioquímicos, pero constituye también una etapa importante de la ingeniería genética (del mismo modo en que se habla de ingeniería química o de ingeniería industrial). Usar y modificar al ser vivo es la ambición de esta nueva disciplina.

Ingeniería genética

Es doble la importancia de la técnica de la ingeniería genética: por una parte, proporciona a la genética básica un medio adicional para comprender mejor los mecanismos de la vida; por otra, permite utilizar esos conocimientos en aplicaciones prácticas. Algunos se propon-

[12] Se le conoce con el término técnico de reacción de la polimerasa en cadena, *Polymerase Chain Reaction*, PCR por sus siglas en inglés.

drán entender el código genético, sus reglas, su puntuación. ¿Cuál es el papel que desempeñan las moléculas que no "sirven para nada" y parecen estar ahí sólo como testigos? ¿Por qué no decodificar el Gran Libro de la vida y el otro, sumamente complejo, con que se diseñó al hombre? De ahí proviene el controvertido y escandaloso proyecto de descifrar el genoma humano. La modificación artificial de un ADN mediante la sustitución de una parte por otra y la observación posterior del resultado de injertarla en una bacteria permitirían comprender el papel de la parte modificada. ¡Pero cuánto trabajo requerirá, si recordamos que el ADN de los animales superiores contiene miles de millones de nucleótidos! Antes de conocer el papel de cada uno de ellos, de almacenar los resultados en una enorme computadora, pasará tan buen tiempo, incluso con la ayuda de máquinas automáticas.

El otro aspecto es más práctico. Si se sabe cómo "confeccionar" las bacterias y los virus, si se pueden clonar los ADN, ¿por qué no usar esa novedosa capacidad como fábrica farmacéutica? ¿Por qué no poner a las bacterias a fabricar productos útiles al ser humano, como la insulina, los factores de coagulación sanguínea, las vacunas y las hormonas del crecimiento? Basta inyectar en las bacterias los fragmentos de ADN que controlan la síntesis de la insulina o de tal o cual vacuna, esperar su rápida reproducción y luego aislar el ADN así obtenido. Los cultivos de bacterias se convierten en laboratorio de síntesis industrial.

¿Por qué no iniciar asimismo nuevas terapias? ¿Por qué no identificar los genes que portan enfermedades genéticas y nulificar sus efectos en las etapas primarias del desarrollo embrionario? Esta revolución ubica a la biología en el centro del progreso científico, sobre todo cuando su importancia crece gracias al avance extraordinario y simultáneo (pero no independiente) de las neurociencias, como veremos más adelante.

Inmunología

Lo que permite funcionar a la mecánica molecular es la extraordinaria especificidad de las moléculas bioquímicas. Éstas tienen formas y estructuras tan específicas que sólo pueden asociarse con moléculas bien definidas, como las piezas de un rompecabezas que no pueden asociarse más que con otras piezas cuyos bordes son compatibles. Las moléculas se reconocen y se alían o se rechazan según su forma tridimensional. Disciplina fascinante, la inmunología sirve para ilustrar la especificidad extrema de las reacciones bioquímicas. Aunque se funda en las especificidades moleculares, la inmunología se desarrolló al principio sin el apoyo molecular. Paradójicamente, se ha limitado a

decretar reglas de compatibilidad e incompatibilidad, una lógica de la "amistad" y de la "enemistad" que permite explicar lógicamente la manera en que todo organismo se defiende de las agresiones químicas del exterior. En realidad, la explicación profunda es de carácter completamente molecular, como lo explica Gérald Edelman con base en la teoría construida por Burnett.

La defensa del organismo queda a cargo de células especiales, los linfocitos, que dan origen a los anticuerpos; éstos constituyen moléculas de formas en extremo variadas y capaces de reconocer de manera específica una molécula extraña y, a partir de ello, neutralizarla. Este mecanismo, además, dispara de inmediato un segundo mecanismo: la multiplicación de las células que producen los anticuerpos *ad hoc*. Se multiplican entonces los defensores específicos del organismo para ese tipo de agresión, listos para enfrentar a los invasores. Si la agresión continúa, los anticuerpos específicos se incrementarán con rapidez. De modo que el sistema inmunológico cuenta con un dispositivo doble: un dispositivo de vigilancia compuesto por una gran variedad de moléculas de reconocimiento (de 10 a 100 millones de moléculas diferentes), y un dispositivo de combate que permite multiplicar la molécula adaptada para el caso.

Este mecanismo se basa en el concepto de "reconocimiento molecular", el cual es extraordinariamente detallado. El sistema inmunológico es capaz de distinguir dos moléculas de proteína, la que pertenece al individuo (el yo) y la otra del intruso (el no yo). Formada por millares de átomos, cada molécula se distingue de otra por el ángulo de dos cadenas de carbono que difiere sólo en algunos grados. Desde hace varios años se llegó a la conclusión de que los mecanismos de defensa inmunológica no recurren necesariamente a los anticuerpos, sino también a las células "asesinas", los linfocitos T, la superficie de cuya membrana contiene moléculas específicas que permiten el reconocimiento de invasores. A partir de ahí los linfocitos se fijan en las membranas y destruyen a los intrusos.

El sistema de defensa actúa por igual contra las bacterias y los virus, la naturaleza de los cuales ha sido esclarecida por la biología molecular. Los virus son partes de ADN o de ARN capaces de reproducirse por separación de cadenas; son incapaces de alimentarse y viven, por lo tanto, como parásitos de las células que infectan. Algunos de esos virus son inofensivos y otros matan a las células. Como todo ADN o ARN, los virus se reproducen, pero pueden asimismo sufrir mutaciones y cambiar de forma. Por esa doble propiedad, la defensa en contra de su intrusión es a menudo difícil. Ciertos virus extraños (no yo) poseen una estructura cercana a la de un fragmento del ADN del individuo

(yo) y el sistema inmunológico pasa apuros para distinguirlos. Otros sufren mutaciones tan veloces que el sistema inmunológico tiene retrasos constantes en su reconocimiento. A veces suceden una *y* otra cosas. Algunos, como el terrible virus del SIDA, poseen las dos propiedades, pero además tienen la propiedad de destruir a las "células asesinas". No sólo se escapan de las defensas inmunológicas, sino que también las destruyen, dejando al individuo vulnerable a todo tipo de ataques virales o bacterianos.

BIOLOGÍA MODERNA

Antes del auge de la biología molecular, la biología era considerada en Francia como una ciencia natural, es decir, como una ciencia de segundo orden, muy lejos de las disciplinas reinas como las matemáticas y la física. Salvo en casos excepcionales, los "mejores alumnos", no tomaban en cuenta a la biología. Por ello era de lo más natural que las matemáticas sirvieran para clasificar al buen estudiante, quien a su vez se dirigía de manera natural a ellas, en un círculo virtuoso que nadie se atrevía a cuestionar.

La biología molecular vino a modificar esta situación y estos prejuicios, pues se ha convertido en una ciencia principal, tan importante como la física. Cuando se observa su evolución, se confirma que ha seguido un desarrollo clásico en extremo, es decir, con un constante ir y venir de la experimentación a la formalización teórica; una formalización sumamente abstracta, para construir y manejar conceptos primarios con una lógica rigurosa y cuyo rasgo distintivo es que prácticamente no recurre a las matemáticas en esa teorización. ¡Y no es que no lo haya intentado! Más bien parece que la formalización biológica es demasiado compleja y variada como para dejarse atrapar en el marco rígido de los conceptos matemáticos actuales. Sin embargo, en cuanto a rigor, la "lógica del ser vivo" no le pide nada a la lógica de la física. La intuición y la originalidad experimental tienen, por otra parte, una importancia esencial en la biología. Si la vocación de las matemáticas es la de servir de lenguaje de la ciencia, no han podido todavía descifrar el de la biología. ¿Será necesario que desarrollen un nuevo capítulo para ese propósito?

La aportación fundamental de la biología moderna es una nueva visión de la vida. El ser vivo es una inmensa fábrica química que transforma, transporta y combina moléculas complejas según las leyes de la fisicoquímica. No obstante, esa mecánica compleja se encuentra programada y está guiada por un programa codificado en el ADN que úni-

camente el azar acumulado durante largos periodos puede hacer evolucionar de manera sostenida. El sistema, en realidad, está compuesto por una serie de sistemas envueltos unos en otros, las células en órganos y los órganos en individuos, que conservan, sin embargo, una coherencia global y una integración perfecta. De modo que el ser vivo está, por un lado, regido por un sistema que parece obedecer todos los principios de la química (y la duplicación *in vitro* del ADN es la mejor prueba), y, por otro, por una mecánica cuya programación detallada, jerarquizada, precisa, no tiene parangón más que con los sistemas automáticos artificiales.

¿Los seres vivos son únicos, o son comunes y corrientes?

¿De qué manera comenzó todo?

La vida se distingue de lo inanimado, de lo mineral, pero para formarse y desprenderse de lo mineral ha requerido casi cuatro mil millones de años. ¿Cómo sucedió? En eso reside quizás el mayor misterio del universo.

Otro aspecto, el más debatido, es desde luego el de la ética. Los progresos de la biología, y en particular de la genética molecular, presentan problemas de gran trascendencia.

ÉTICA

Los problemas éticos comienzan a partir del momento en que somos capaces de modificar la célula germinal, la célula reproductora e incluso el mensaje genético que lleva. Al manipular el ADN del óvulo de la drosofila, se producen drosofilas cuyas antenas se ven remplazadas por patas; al manipular los óvulos del pichón, se producen monstruos, pichones con cabeza de pollo. ¿Tenemos el derecho de interferir de esta manera en la evolución natural de las especies? ¿Dónde debemos detenernos?

Si se trata de modificar células germinales humanas para erradicar genes portadores de enfermedades hereditarias, todo el mundo consentirá en ello. Si se trata de cambiar una pequeña malformación poco estética, tal vez se aceptará. Si se trata de elegir la forma de la nariz o el color de los ojos, probablemente se dirá ¡alto ahí! ¿Pero se establecerá el mismo límite para pobres y ricos, para quienes "saben" y para quienes "contemplan"? Algunos de los que están dispuestos a perseguir a la ciencia por cualquier motivo, afirman que "debe prohibirse toda manipulación genética. Ahora bien, queda absolutamente fuera de discusión detener investigaciones que el día de mañana podrían salvar millones de vidas humanas, permitirán la erradicación

de temibles enfermedades, producirán alimentos para todos y harán crecer plantas en los linderos del desierto de Sahel. Pero también es obvio que no podemos permitir cualquier cosa. La formación de comités éticos parece ser una buena manera de abordar el problema, aunque éstos se verán desbordados con rapidez si carecen de respaldo en el seno de las propias comunidades de investigadores. Cada instituto, cada gran organismo de investigación debe organizar seminarios y coloquios y constituir grupos de discusión sobre el tema. La diversidad de opiniones de los investigadores y su dinamismo garantizarán la pluralidad de los debates, sobre los cuales los ciudadanos y sus representantes electos deberán ser informados periódicamente. Los investigadores mismos son una de las mejores garantías del control de la ciencia por la sociedad. ¡Pero hace falta consultarlos y escucharlos! La otra garantía es desde luego la educación científica para todos, la cultura científica. Sólo así se logrará vigilar de manera sistemática que ningún "iluminado" traspase la línea amarilla: es necesario aprender, informar y, posteriormente, debatir.

Historia

Si nos interesamos en la historia de las ideas, resulta apasionante echar una mirada a las etapas de la revolución molecular en biología.

La primera etapa consistió en vincular los enfoques genéticos y bioquímicos. El paso decisivo fue el dado por Beadle y Tatum, quienes durante la guerra mostraron, con la ayuda de una levadura, que las mutaciones genéticas transformaban la naturaleza de las enzimas. A partir de ese momento surgirá la idea de que los genes controlan la producción de las enzimas particulares de cada tipo de ser vivo. Estos trabajos desembocarán en la famosa frase "un gene-una enzima". Pero ¿cuál era la naturaleza química del gene? ¿El ácido nucleico o las proteínas? Porque ambos se encontraban presentes en los cromosomas. Se sabe que Avery daría la primera respuesta a favor del ADN y que, como se dice en el *rugby*, Watson y Crick "transformarán la prueba".

La segunda etapa, también fundamental, fue el descubrimiento de la sexualidad en las bacterias, pues proporcionará a los investigadores un organismo vivo excepcionalmente adecuado para la experimentación. La idea germinó poco a poco a partir de una visión reduccionista de la vida, sin duda bajo la influencia de lo que había sucedido en la física moderna. ¿No fue gracias al estudio de lo infinitamente pequeño que se llegó a entender la física? ¿Por qué no hacer lo mismo en la biología mediante el estudio de las estructuras básicas de la vida en las

células? ¿De dónde viene el interés en esos seres vivos unicelulares y simples llamados bacterias?

Siguiendo el impulso de Max Delbrück, físico convertido a la biología, se intentará primero bombardear las células con rayos x y producir "algo", como en la física de partículas. Con ese método Müller había obtenido mutaciones en la drosofila, pero en la bacteria no se lograba gran cosa. Delbrück, Luria y Hershey estudiaron la contaminación de las bacterias por virus: los bacteriófagos. Gradualmente se irá descubriendo que las bacterias sufren mutaciones y, gracias a Lederber y Tatum, que tienen una sexualidad. Este descubrimiento será fundamental para la biología molecular, la cual convertirá a la *Escherichia coli* en el símbolo y el material preferido de los biólogos moleculares.

La tercera condición fue el desarrollo de las técnicas fisicoquímicas: los rayos x para el estudio de las estructuras de grandes moléculas. El grupo de Cambridge, reunido en torno a Bragg, desempeñará en ello el papel motriz, con el empleo de exploradores radioactivos para observar las moléculas en su peregrinaje celular, siguiendo la técnica inventada por Hevesy.

Todo esto convergirá en el descubrimiento de la estructura del ADN realizado por Watson y Crick; el primero era un joven especialista en genética bacteriana, y el segundo un físico en cristalografía del grupo de Bragg.

De esta manera se puede reconstruir *a posteriori* un desarrollo lógico de acercamientos sucesivos, de desencadenamiento de ideas que condujeron al surgimiento de nuevos conceptos, los cuales a su vez...

Pese a que este relato se parece al de *Alicia en el país de las maravillas,* la realidad fue mucho más caótica. Se necesitaron años para entender ciertas observaciones; se desarrollaron numerosas ideas que resultaron falsas; se intentó, se dudó y se perdió tiempo. La comunidad de biólogos moleculares se sumergió en la duda en el periodo que va de 1965 a 1972. Ese ambiente psicológico no era del todo grato ni acogedor para los pioneros, quienes iban a trastocar toda la visión que se tenía de la biología.[13] Y, sin embargo, qué aventura humana tan maravillosa...

[13] Francois Jacob relata que cuando empezó a trabajar en el laboratorio de André Lwoff, ¡había que leer en total cinco artículos fundamentales sobre la genética de las bacterias!

V. LA INFORMACIÓN

EN LA SEGUNDA MITAD de la década de 1940, mientras anda en busca de respuestas a meras preocupaciones técnicas, Claude Shannon, ingeniero de la compañía telefónica Bell, va sentando las bases teóricas de lo que se conocerá como la teoría de la información, sin imaginar ni remotamente que está a punto de iniciar una de las aventuras más extraordinarias de la humanidad, pues a partir de sus descubrimientos hemos vivido en la era de la información.

El propósito inicial de Shannon era muy modesto y estaba bien circunscrito: transmitir señales telegráficas o telefónicas de la mejor manera posible. Desde luego que no inventó la radio o el teléfono, pues ya en 1948 se podían transmitir señales con toda eficacia a través del Atlántico. Lo que él se proponía era teorizar lo que se conocía sobre el tema para mejorar así los métodos de transmisión y hacerlos más rápidos, menos costosos en términos de energía y menos falibles.

INFORMACIÓN

Para el efecto, elabora un nuevo parámetro: la cantidad de información contenida en un mensaje. La define como la disminución de la incertidumbre que resulta de la recepción del mensaje.

En su opinión, el concepto de información carece de cualquier relación con el significado del mensaje: se trata sólo de su contenido en signos, de su naturaleza, de su número, de su distribución.

A partir de esta definición de información, Shannon examina teóricamente la forma de realizar una comunicación sin errores. Para lograr este propósito, se interesa en problemas como el de la adaptación del código al canal de transmisión (teléfono, telégrafo, etc.), la estructura del mensaje mismo y, sobre todo, las transformaciones que sufre durante su transmisión.

Cuando oímos la voz de un corresponsal estadunidense, no se trata del sonido de su voz transmitido por un tubo submarino de sonido de varios miles de kilómetros de largo. El emisor, es decir, el portador de la voz del teléfono, es un sistema electrónico que, siguiendo ciertas reglas y un código, transforma los sonidos emitidos por la voz del emisor en una serie de impulsos eléctricos. Estos impulsos se transmiten

en forma de señales de radio —lo cual implica una segunda codificación—, o bien en forma de señales eléctricas si son transportadas a través de un cable submarino. A su llegada, es decir, en el auricular del receptor, el mensaje codificado se decodifica y se transforma en mensaje sonoro gracias a una bocina que reconstituirá la voz del emisor.

En realidad, el circuito no es tan directo debido a que el mensaje debe pasar por centrales telefónicas que distribuyen los mensajes a través de complejos sistemas que se suceden en un continuo y que pueden sufrir cierto deterioro. Una parte del mensaje puede borrarse (u olvidarse), otra puede volverse inaudible cuando se superpone un "ruido parásito", dos mensajes o dos partes de un mensaje pueden llegar a mezclarse, etcétera.

Para el ingeniero en telecomunicaciones, la cuestión que se plantea es simple, si bien la solución es delicada: ¿cómo prevenir esos percances o bien, de una manera más realista, cómo reducir su frecuencia? Y en caso de presentarse, ¿cómo corregirlos?

Codificación

A continuación, Shannon extiende su teoría a la codificación en general y enuncia los criterios para definir un código confiable que se adapte a la transmisión. Considera que el criterio principal es la cantidad máxima de información que puede transmitir un código durante cierto tiempo definido. En seguida compara los diferentes códigos y su eficacia relativa: el morse (que durante mucho tiempo fue el preferido de militares y *boy scouts*), el código binario y el analógico, cuya confrontación señalamos al hablar de las computadoras. Se interesa también en los códigos secretos, en su diseño, así como en el desarrollo de técnicas para descifrarlos.

Llega así a desarrollar estudios cuantitativos sobre las lenguas. Realiza estudios estadísticos sobre la longitud de las palabras, su frecuencia, la de los fonemas, etc., con el fin de corregir los errores "de forma automática", o bien para descifrar más fácilmente los códigos secretos. Pone en relieve el hecho de que toda lengua, todo mensaje codificado conlleva cierto grado de traslape o, como él lo llama, una "redundancia". Esta redundancia es la que permite corregir los errores, ya se trate de un lapsus, de un espacio en blanco o de un error de impresión o de transmisión.

En resumen, a partir de su concepto de información Shannon desarrolla una teoría elegante y eficaz de las telecomunicaciones. Pero va más allá: inventa un nuevo parámetro para describir el mundo que

nos rodea. Ya no se trata de la temperatura, la presión, la intensidad o frecuencia de la corriente eléctrica, etc.; se trata de un parámetro que trasciende todo eso y que tiene una importancia más profunda y general. La información se convertirá no sólo en la base de la teoría de las comunicaciones que utilizarán los ingenieros cotidianamente, sino que llegará a ser el parámetro cardinal de todos los sistemas en los que existen relaciones entre sus elementos, sin importar el medio físico de esas relaciones.

De la información a la comunicación

Al principio, la teoría de la información tuvo sobre todo aplicaciones técnicas y electrónicas.

Dennis Gabor inventa así la holografía, y en torno a ese tipo de aplicaciones se desarrollará una teoría de las imágenes. Resulta del todo natural que después del manejo de la señal a lo largo de los cables telefónicos, es decir, en forma secuencial en una sola dimensión —el tiempo—, el interés se dirija al tratamiento de señales en dos dimensiones, es decir, a las imágenes electrónicas, lo cual desembocará en el extraordinario invento de la televisión. El mejoramiento de las imágenes en blanco y negro, las imágenes a color, la miniaturización, la cámara electrónica, son descubrimientos y avances tecnológicos que se suceden a un ritmo cada vez más rápido. En todos los casos, los progresos teóricos y la producción de aparatos se encuentran estrechamente vinculados.

En todos estos desarrollos se encuentra presente la problemática de Shannon: el mensaje que va a transmitirse —una imagen en dos o tres dimensiones, un discurso sonoro asociado a ella— transforma su dimensión física de acuerdo con una ley de correspondencia, con un código. Esa dimensión física se transmite y a su llegada se reconstituyen la imagen y el sonido gracias a la decodificación. Para transmitir una imagen de modo secuencial, basta subdividir el rectángulo que se desea transmitir en pequeños cuadros ubicados a lo largo y ancho, codificarlos uno a uno y después transmitirlos siguiendo un orden definido, mediante un "barrido", como se dice en términos técnicos. A esto se le llamará descomposición y secuencialización de la información en *pixeles*.[1]

En todas esas aplicaciones los códigos empleados en la transmisión de las señales resultan esenciales. El código binario se emplea en las

[1] Véase el capítulo III.

computadoras; los mensajes secretos requieren también de uno propio que, al principio, no será el de las telecomunicaciones.

Recordemos el titubeo histórico de los pioneros de la computadora entre lo numérico y lo analógico. Al contrario de lo que sucedió con los creadores de las computadoras, los ingenieros en telecomunicaciones tuvieron confianza en lo analógico desde un principio. En torno a las técnicas basadas en los circuitos electrónicos para manipular, transportar y transformar las señales eléctricas cuya forma y amplitud se ha modulado a discreción, se desarrolló un conjunto de principios llamado tratamiento de señal, que constituye una extensión de la teoría de la información que se incorporará rápidamente a ella.

Claro está que todos esos desarrollos se efectúan en forma paralela a la explosión de la electrónica, que forma su sustrato físico. El circuito electrónico constituye el elemento básico de todos los sistemas de comunicación, tanto para su codificación como para la transmisión de datos. El mismo circuito electrónico evolucionará según el progreso técnico, así que tan pronto como aparece el transistor, se utiliza para remplazar los viejos bulbos y permitir al mismo tiempo la miniaturización de toda la electrónica, de manera analógica en su caso, en especial por sus propiedades de ampliación y modulación de señales.

Con todo, la expansión de las comunicaciones se produce también gracias a un aporte exógeno: los satélites. La combinación de las comunicaciones y el espacio se efectúa al principio por un interés en la exploración espacial. Cuando se quiere guiar un satélite o enviar una misión a la Luna, es necesario emitir señales de orientación sin ningún error. Cuando se desea fotografiar la superficie de Mercurio, de Marte o de los satélites de Júpiter, es necesario poder captar las imágenes en forma numérica, transmitirlas a la Tierra y después trabajar la información encapsulada en forma de "ruido" para obtener las mejores imágenes en la medida de lo posible. Sujetos a los requerimientos espaciales, el tratamiento de las señales y las imágenes realizarán enormes progresos, La llegada de la era espacial resultó ser el detonador de la investigación en las comunicaciones.

En otros tiempos, para transmitir una señal a través del Atlántico había que utilizar cables submarinos difíciles de instalar y más difíciles de mantener o reparar, o bien señales de radio que se reflejaran en las capas superiores de la atmósfera: la ionósfera, cuya naturaleza inestable dificultaba la transmisión. El satélite geoestacionario, es decir, que gira a la misma velocidad que la Tierra, acaba con esos inconvenientes. Para ello se instala en el cielo, a una gran altura, una red de satélites fijos que se comunican entre sí e intercambian información. Pero también se comunican con la Tierra en la zona que cubren. Para transmitir un

mensaje a través del Atlántico, basta enviarlo verticalmente en señal de radio al satélite adecuado, el cual lo transmite a otro satélite que lo envía a su vez a la Tierra. En cada paso hay una recepción, una decodificación, una codificación y una transmisión. Todo ello funciona de maravilla.

El espacio está a punto de convertirse en el instrumento principal de las comunicaciones:[2] satélites para la telefonía, satélites de televisión, satélites de observación de la Tierra y satélites militares (los más numerosos). Hoy en día, el espacio que circunda a la Tierra se encuentra saturado por las comunicaciones, y de pronto el mundo se ha convertido en una aldea en lo que respecta a la información.

Al principio, entonces, la teoría de la información se desarrolla en el sector de las comunicaciones, un mundo electrónico que en sus comienzos ignora el sistema binario.

Entropía e información

En el plan teórico, Léon Brillouin y Leo Szilard van a establecer el vínculo entre la información y la realidad del mundo físico. Shannon había establecido que la cantidad de información se encontraba relacionada con la incertidumbre. Brillouin relaciona la cantidad con la dimensión termodinámica llamada "entropía", que los creadores de la termodinámica estadística, en especial Boltzmann interpretaron como la medida del desorden de un sistema. El grado de desorden es la medida de la incertidumbre. Toda ganancia de información se vincula, así, con una disminución de la entropía. Ésta mide a la vez el desorden y nuestra ignorancia del sistema. La información mide el orden y nuestro grado de conocimiento del sistema. El vínculo entre la información y lo que Brillouin llamará la "negaentropía" nos lleva a comprender que no se obtiene información de un sistema gratuitamente. El investigador perturba el sistema en el momento en que interviene para obtener información. Cuando se trata de observar una estrella, la perturbación no es significativa, puesto que la energía que se gasta en la observación resulta infinitamente pequeña en relación con la energía del objeto. La situación cambia cuando se trata de observar lo infinitamente pequeño: el observador perturba necesariamente el sistema que desea observar. ¿Quién puede negar que los experimentos de Rutherford para abrir el núcleo del átomo y observar sus componentes no perturbaron el sistema observado?

[2] ¿Dónde se ubica el cable óptico con respecto a éste? ¿Como complemento o en competencia? El cable óptico permite transmitir gran cantidad de información sin errores, pero se requiere instalar una red. El satélite, más limitado en cuanto a flujo de información, es más movible.

Eso era, además, lo que Heisenberg expresaba de otra manera en el nivel microscópico, a partir de su principio de incertidumbre. La generalización de Brillouin desembocará, por otra parte, en un concepto que resultará sumamente fecundo. Él considera que todo sistema físico de transmisión de señales, sean mecánicas o eléctricas, puede expresarse en términos de comunicación, de transmisión de información. Cuando un engrane o un cardán permiten unir el volante de un auto con la dirección de las ruedas, se trata de un sistema de transmisión de información; cuando un fotón de luz toca nuestra retina, se trata también de un sistema de transmisión de información, etc. De pronto todos los teoremas de Shannon recibirán una interpretación termodinámica. La tendencia a la pérdida de información durante la transmisión responde al segundo principio de la termodinámica, según el cual el desorden de un sistema tiende a incrementarse.

El mundo de Shannon y el mundo de Boltzmann se han encontrado, y apenas comenzamos a entender y aprovechar los resultados de este encuentro tan fértil.

Música e información

La música es una sucesión de sonidos, de signos melódicamente organizados. Se trata, así, de un mensaje escrito según cierto código. ¿Cuáles son las reglas que vuelven a la música tan agradable al oído? Parece que esta pregunta cae dentro del campo tanto de la psicología como de la fisiología y escapa a toda teoría científica. Sin embargo, gracias en parte al equipo que la electrónica pone a disposición del musicólogo y en parte a las formas de pensamiento y de análisis desarrolladas por la teoría de la información, se ve nacer una nueva disciplina en los linderos de la física, del arte y de la teoría de la información, a la que podríamos llamar "musicología científica". En Francia, el desarrollo de esta disciplina se asociará con nombres célebres como el de Pierre Boulez (junto con el del centro que creó, el IRCAM*) y el de Iannis Xenakis, o a nombres no tan célebres, pero también fundamentales, como el de Jean-Claude Risset. Los pioneros de estos estudios, sin embargo, fueron un conjunto de ingenieros que trabajaban en los laboratorios Bell, los mismos donde Shannon había inventado la teoría de la información. Los progresos extraordinariamente rápidos que se lograron en esta disciplina permitieron emprender en seguida el descubrimiento de las reglas de la escritura musical.

*[T.] Siglas que corresponden a Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique.

T. En inglés *informatics* o *information science.*

Se pudo demostrar que las reglas llamadas patrones melódicos de Bach resultaban insuficientes para escribir piezas musicales audibles. Se han descubierto reglas complementarias más sutiles, más complejas, que permiten hoy en día escribir de manera automática secuencias musicales que el oído podría atribuir a tal o cual gran compositor.

Se ha estudiado también el diseño de las salas de concierto; se inventan nuevos instrumentos de música llamados electrónicos. Se producen sintetizadores de sonido, bocinas sin defectos, etc. La forma de producir música, de integrar todas las sonoridades, transforma poco a poco la manera de escribirla. La conservación de la música y su reproducción constituyen también un terreno en plena revolución. En la actualidad se pueden filtrar, "limpiar" y recuperar discos antiguos para reproducirlos mejorando su calidad. Se trata de una industria extraordinaria y novedosa.

Además de sus enormes consecuencias prácticas y culturales, dichos progresos tendrán sin duda aplicaciones importantes para explicar el funcionamiento del cerebro, por ejemplo, cuando se establezca la relación entre la fonética de la música y la del lenguaje.

Desde un punto de vista metodológico, la musicología científica ilumina uno de los mecanismos fundamentales de la creación científica —y probablemente de la creación de todo género—, al que podríamos llamar *combinatoria estructural.* Un mensaje musical se compone de una sucesión de notas, pero estructurada y con ritmo. Las estructuras se presentan en diferentes niveles: el de la frase musical, el del tema, el de la melodía global. Las estructuras encerradas en escalas constituyen combinaciones de notas, de motivos musicales, que desde el punto de vista formal se parecen a un lenguaje; la diferencia radica en que la finalidad del lenguaje es el significado, mientras que en la música la finalidad de una pieza musical es la sensación musical.

La aplicación de todas estas técnicas tanto a las imágenes como a la música constituye la raíz de lo que se denomina la civilización de las comunicaciones. Al mencionar a ésta (lo cual se hace expresamente), nos referimos a menudo al sentido y al contenido de los mensajes, ya se trate de la evolución de la música popular, de la dictadura de la televisión o de la invasión del teléfono portátil, sin olvidar nunca que la revolución de la información sirvió de guía a todo el progreso técnico. Esta regla seguirá vigente: cada nuevo avance técnico desembocará en una nueva revolución en el nivel del contenido de los mensajes.

INFORMÁTICA

Las computadoras constituyen el otro gran campo en donde se aplicó la teoría de la información desde un principio. Desde el inicio Shannon tomó en cuenta el lenguaje binario y definió la unidad de medida de la información (el *bit)* según la alternativa binaria. Todas las medidas definidas por Shannon en lo que se refiere a almacenamiento de información, transmisión de información y codificación, se integraron con enorme rapidez al mundo de las computadoras, cuya ciencia además se denominará... informática (¡como en francés y en español!).

Era inevitable que se diera el encuentro entre el mundo de las comunicaciones y el de las computadoras, que son usuarios intensivos de la teoría de la información. Pero este encuentro entre dos universos que representan un gran poder económico se anticipaba como algo difícil, y así lo fue. En ambos bandos, las legiones de brillantes ingenieros e investigadores se beneficiaban del predominio y del uso masivo de la electrónica y de la física de los sólidos, pero entre los dos mundos existía un profundo abismo cultural.

El mundo de las computadoras es el del lenguaje binario; el de las comunicaciones es analógico, el de una señal compleja que se ha logrado transformar, transportar, modular y modificar en toda su complejidad. El mundo de las computadoras es un universo frío en donde el progreso técnico se parece mucho a una carrera hacia lo "más complejo". Tiende a lo complejo mediante la combinación infinita de lo simple. El mundo de las comunicaciones, al contrario, es el mundo del ingenio, de la flexibilidad, de la adaptación, de lo complejo manejado *en el interior* de su complejidad. Mientras que el código binario parte la complejidad en pequeños trozos para manejarla como vulgares sumas, el analógico toma la señal tal como se presenta y la maneja respetando su integridad, su forma y su ritmo.

El acercamiento entre los dos universos se realiza cuando las computadoras entran al mundo de lo micro. ¡Gracias, Apple!

Desde entonces, la tecnología y lo numérico gobernarán todo. Telecomunicaciones, telefonía, discos, televisión: el mundo de las comunicaciones se vuelca a lo numérico en el transcurso de unos años.[3] La radio en la actualidad es la excepción, pero ya llegará su turno. La razón del éxito de lo numérico en el mundo de la comunicación es la misma que en las computadoras: potencia y facilidad de fabricación, mejoramiento de la calidad. Así, la televisión numérica

[3] Francia destacará inútilmente con su famosa televisión de alta resolución.

brinda una definición de diez a cien veces superior a la de la televisión actual. La rapidez de esta conversión se explica por el lenguaje de la teoría de la información estudiado y dominado por Shannon y que pertenece a los dos mundos. En pocos años los propios ingenieros convertirán sus técnicas de manejo de señal analógica a técnicas equivalentes en binario. Lo numérico es un apoyo que invade las comunicaciones, pero sin borrar la cultura del manejo de la señal. Ello ocurre mucho más fácilmente cuando el mundo de lo "micro" opera en términos cercanos a los de las telecomunicaciones. Flexibilidad, inventiva y adaptación son los imperativos que comparten los dos mundos. En el matrimonio, hablar el mismo idioma y compartir las mismas expectativas ¡ayuda mucho!...

La fusión es ya completa y se anuncia la inminente computadora-teléfono-fax-televisión y los programas de televisión vía líneas telefónicas.

La compactación de datos se deriva de los trabajos de Joseph Fourier en el siglo XIX. Consiste en transmitir sólo una parte de la señal para reconstituirla por completo después; es una técnica típica de lo analógico, pese a lo cual su uso numérico no representa hoy ningún problema y multiplica en diez o veinte veces la capacidad de transmisión tanto de las líneas eléctricas como de las hertzianas.

La combinación de la computadora y la teoría de la información empleada en las imágenes permitirá desarrollar lo que Dennis Gabor había inventado: la imagen en tres dimensiones, a la que había bautizado como holografía y cuyo éxito se concretará con el nombre de tomografía.[4]

TOMOGRAFÍA

Con la ayuda de estos métodos, se exploran los objetos sólidos y se reconstituyen sus estructuras internas en forma de imágenes tridimensionales, de modo que la aplicación de rayos X en la investigación sobre el cerebro, y más tarde el uso del ultrasonido en el cuerpo humano permiten el desarrollo de scanners médicos. Con las señales recibidas, se reconstituye una imagen interna en 3D[5] del cuerpo humano. La investigación del subsuelo terrestre con la ayuda de ondas emitidas por sismos o explosiones artificiales se lleva a cabo hoy día mediante la reconstrucción de imágenes en 3D del interior de la Tierra, lo que permite tanto localizar petróleo como comprender *lo*

[4] Que tiene la particularidad de presentar técnicas muy diferentes, ya que a partir de entonces todo es numérico, pero cuyo fondo es básicamente el mismo.

[5] 3D, abreviatura de "tres dimensiones"; significa *en el espacio, en relieve.*

que mueve las placas tectónicas. La exploración del cerebro con ayuda de imágenes 3D por medio de positrones, por resonancia magnética nuclear o por magnetismo, vuelve posible en la actualidad establecer el vínculo entre la actividad cerebral y la localización del consumo de energía en el interior del cerebro, entre otras cosas.

Se podrían seguir enumerando, así, las tecnologías maravillosas que se avizoran. Cabe volver a mencionar que todas ellas son hijas de la teoría de la información. Sin embargo, la generalización más inesperada y más profunda de esta teoría encuentra en el campo de la biología, y se producirá en dos sentidos diferentes.

Cibernética

Norbert Wiener, quien fuera primero profesor y después colega de Claude Shannon en el Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), desarrolló en los años cuarenta lo que se denominará cibernética, disciplina antecesora de lo que más tarde se convertirá en la "teoría de sistemas".

Durante la segunda Guerra Mundial, el gobierno estadunidense le encargó a Wiener la concepción de un sistema de defensa antiaérea (DCA)* automático. Se requería contar con una máquina capaz de detectar el movimiento de los aviones enemigos, de transmitir la información al cañón y dirigirlo según la información recibida. La orientación de la mira del cañón estaba sujeta a la observación de aviones. Dado que el disparo del cañón desde la batería donde se encontraba podía considerarse como un envío de información al avión, la trilogía avión-máquina-cañón constituía un "rizo de información". La orientación del cañón estaba dirigida de manera permanente por la posición del avión hasta que éste era alcanzado; y a la inversa, para evitar ser alcanzado, la posición del avión quedaba determinada por la posición del cañón. Se encontraba uno frente a un claro problema informativo de acción y reacción: recabar información, traducirla en acción para controlar la orientación del cañón y luego disparar el tiro. Dicho de otro modo, informarse/comunicar/controlar serán las palabras clave de la ciencia que fundará Wiener: la cibernética, o la ciencia del control. La importancia de la idea de Wiener radica en haber formulado en términos abstractos la transferencia de la información y, en consecuencia, haberle asignado un significado general.

El enfoque de Wiener comprende los sistemas vinculados de tal

*[T.] DCA: *défense contre aéronefs.*

modo que formen cadenas de información, es decir, son sistemas que actúan sobre la causa en función de un resultado. Demuestra que, sin importar su naturaleza física, todo sistema autorregulado obedece las mismas reglas: se informa y reacciona enviando una señal cuyo papel es el de responder a la variación observada. Así se maneja el control. El esquema teórico se aplica tanto a los sistemas mecánicos como a los eléctricos.

Como ejemplo de sistema mecánico regulado, mencionemos el del dispensador de trigo, concebido en el siglo XVI, que está constituido por un conducto para el trigo y una rueda encargada de triturarlo. El eje de la rueda estaba provisto de una saliente que a cada vuelta empujaba con un golpe el conducto, lo que hacía caer algunos granos bajo la rueda, la cual se alimentaba así constantemente sin saturarse jamás. Desde un punto de vista cibernético, podría decirse que el sistema observa cuando los granos anteriores han sido molidos y da entonces la orden de enviar grano nuevo del almacén. La saliente situada en el eje de la rueda actúa, por lo tanto, como un receptor de información y un control de la alimentación de la rueda.

Como ejemplo de sistema eléctrico podemos tomar el del calentador de agua. Se coloca un termómetro en el agua; en el momento en que ésta alcanza cierta temperatura, digamos 70°C, se interrumpe el calentador, y cuando desciende a menos de 50°C, se enciende. De esta manera, el agua se mantiene a una temperatura que va de 50° a 70°C. El termómetro manda información al circuito eléctrico de calefacción, que controla la temperatura del agua respondiendo a la variación que observa.

En estos dos ejemplos, que se eligieron por su sencillez, se puede establecer un rizo regulador basado en la circulación de información: en el primer caso, con los elementos rueda/eje de rotación con saliente/conducto; en el segundo, con los elementos agua/termómetro/sistema eléctrico de calefacción.

Biocibernética

Los rizos de regulación nos hacen pensar de inmediato en los mecanismos de regulación del interior del cuerpo humano, que había explorado Claude Bernard en el siglo XIX. Por ejemplo, la regulación del nivel de azúcar en la sangre, que se mantiene a un nivel casi constante, a pesar los esfuerzos que consumen azúcar o de las comidas que la proporcionan. El hombre (al igual que el animal) logra controlar ese nivel, ya sea fijando el azúcar en los tejidos o en el hígado, o liberando

el glucógeno almacenado. La insulina y en consecuencia las glándulas endócrinas desempeñan un papel fundamental en ese proceso.

De la misma manera, a pesar de las fluctuaciones térmicas exteriores, la temperatura del cuerpo permanece cercana a los 37°C. Cuando hace frío, el organismo quema las grasas para producir energía; y cuando hace calor produce sudor, cuya evaporación enfría el cuerpo. El conjunto se mantiene alrededor de esa temperatura gracias al fundamental del hipotálamo.

Para Wiener y sus colegas fisiólogos de Boston, los animales funcionan entonces como un sistema que recibe del exterior información química, lumínica, sonora o térmica, que es integrada y decodifica para reaccionar después y mantener los "grandes equilibrios" interiores. Es lo que llamamos la homeostasis.

Habrá otras fructíferas analogías entre la fisiología y el mundo electrónico. Los latidos del corazón, por ejemplo, que parecen latidos periódicos (¡no lo son en realidad!): ¿acaso no podrían considerarse como un sistema cuya periodicidad se puede regular?

Una vez actualizada la estructura del ADN y a partir de que con Watson y Crick se descubre que la doble hélice contiene los genes, será posible establecer un nuevo puente entre la teoría de la información y la biología. Al hablar de "código" genético, el físico George Gamow nos recuerda los trabajos de Shannon sobre la codificación. Se establece de inmediato la analogía entre código genético y lenguaje. Después de que el equipo francés Monod/Jacob y el inglés Crick/Brenner muestran que la traducción de instrucciones codificadas en el ADN sólo puede realizarse por medio del ARN, resulta muy natural recurrir al lenguaje de la información: se dirá entonces que tal gene está codificado por una proteína, que tal enzima desempeña un papel de retroalimentación en el mecanismo, etc. Cuando se llega a comprender que la célula es un sistema que implica regulaciones y cadenas de información, se vuelve del todo lógico que la fisiología celular se desarrolle siguiendo el enfoque cibernético.

De este modo, el conjunto de cuestiones relativas a la genética, pero también a la biología del desarrollo, se plantean como un problema gigantesco de transmisión de información: ¿cómo transmitir a las células germinales los miles de datos contenidos en el organismo? ¿Cómo dirigir el desarrollo del organismo? ¿Cómo fabricar órganos coordinados e integrados unos con otros a partir de un mensaje genético, de instrucciones codificadas en el ADN de las células germinales?

La naturaleza misma de un organismo, su estructura y sus diversos niveles que se integran unos en otros sólo encuentran coherencia entre las diversas unidades, así como entre sus diferentes niveles, gra-

cias a la circulación de información. En consecuencia, las mutaciones genéticas a las que se debe el surgimiento de nuevas especies se revelan o pueden considerarse como "ruidos", errores en el proceso de transmisión de información genética.

La información biológica se convierte a su vez en objeto de estudio. En el momento en que los biólogos moleculares usan las computadoras para almacenar e inventariar la decodificación de los diferentes genomas, el ciclo se cierra: las máquinas informáticas se encargan de almacenar la información genética.

Hemos visto el enorme campo que cubre y cubrirá la teoría de la información, de la cual sólo hemos dado aquí una imagen fragmentada. Asimismo, todos los sistemas naturales, sean ecológicos, climáticos o estratigráficos, pueden abordarse provechosamente con la ayuda de los conceptos de la cibernética o de la teoría de la información. Las ciencias humanas, desde el estudio del lenguaje hasta la economía, pueden sacar provecho de esta teoría, tal como lo han demostrado ambas disciplinas.

Incluso el tema del *sentido,* que Shannon había excluido de su definición, puede abordarse dentro de la misma problemática. ¿Acaso una información, en la acepción corriente del término, no tiene la característica de enseñar, es decir, disminuye nuestra ignorancia, y, en último término, reduce nuestra ignorancia sobre el conocimiento del mundo? ¿Acaso no puede medirse, como lo plantea Shannon?

Tenemos aquí el esbozo de una teoría muy general del conocimiento que habrá de influir en la pedagogía o en el aprendizaje, así como en el funcionamiento de la memoria.

¡Cuánto se ha avanzado después de Shannon!

VI. CUÁNTICOS

SI BIEN LA MECÁNICA cuántica nació antes de la segunda Guerra Mundial, sólo llegó a transformar plenamente a la física tras el conflicto mundial, y no de manera inmediata. Tuvo un surgimiento difícil, sobre todo en Francia, pues los conceptos que introducía eran tan novedosos que perturbaban a los físicos clásicos, y la resistencia a las nuevas ideas era tenaz. Al evocar más tarde esos años difíciles, "el padre de los cuantos", Max Planck,[1] dijo: "En las ciencias, una nueva verdad jamás logra establecerse convenciendo y llevando la luz a sus adversarios, sino más bien cuando éstos desaparecen y crece una nueva generación que ya está familiarizada con esa nueva verdad".

Nacida en Europa, la mecánica cuántica invadirá a la física desde Estados Unidos. El dominio estadunidense, que habrá de tener consecuencias múltiples en los planos cultural y tecnológico, se debe a dos factores determinantes. Por un lado, a la extraordinaria emigración científica provocada por el nazismo:[2] los europeos, que habían sido los pioneros de la mecánica cuántica, la llevaron consigo allende el Atlántico. Por el otro, a la flexibilidad del sistema universitario estadunidense, descentralizado y con responsabilidades propias, que supo integrar la física cuántica en sus programas y producir así toda una generación de físicos jóvenes formados completamente bajo las nuevas ideas.

Podría decirse que antes de la segunda Guerra Mundial los físicos estadunidenses habían ido a Europa a aprender la nueva física; después sucedió lo contrario. Toda la generación de brillantes físicos europeos que se desarrollará a mediados de la década de los sesenta se formó en Estados Unidos y en menor medida en Inglaterra. Estos hechos deben tenerse en cuenta si deseamos entender la historia de las ideas.

De cualquier modo, subrayemos en principio el hecho de que el "modelo de la mecánica cuántica", una de las más bellas "teorías" elaboradas por la inteligencia humana, permitió un desarrollo extraordinario de la física de la posguerra, en particular en tres direcciones: la estructura del núcleo del átomo, la física del estado sólido y la óptica.

[1] *Autobiographie scientifique*, París, Flammarion, 1991.

[2] Entre los físicos que emigraron en ese entonces a Estados Unidos, podemos citar a Enrico Fermi, Emilio Segré (Italia), Victor Weiskopft, Hans Bethe, Albert Einstein (Alemania), Edward Teller, Leo Szilard, John von Neumann, Eugene Wigner (Hungría) y Léon Brillouin (Francia).

Óptica cuántica

Empezaremos con el examen de la óptica cuántica y la extraordinaria claridad que proyectará sobre las relaciones entre luz y materia. Niels Bohr había abierto brecha con su modelo del átomo; había vinculado la emisión (o la absorción) de luz con ciertos movimientos de electrones dentro de los átomos; una vez desbrozado el camino, estableció un vínculo entre luz y materia, vínculo que será explorado y explotado por la óptica cuántica.

La base de todos los razonamientos es siempre la misma. Los electrones de los átomos son objetos cuánticos, por lo cual ocupan sólo niveles de energía bien definidos, muy diferenciados, separados por zonas prohibidas de energía. La imagen de la escalera, con sus peldaños separados por vacíos, traduce bien esta situación. Pero, además, los movimientos verticales de un "peldaño" a otro sólo pueden darse con la cantidad exacta de energía que separa dos "peldaños". La cantidad de energía requerida para saltar de un peldaño a otro puede proporcionarla la luz. Se trata, entonces, de una longitud de onda (de un color) que corresponde de manera exacta con la diferencia de energía que separa los dos niveles.[3] De igual modo, cuando un electrón salta de manera espontánea de un nivel de energía superior para caer en uno inferior, va a "compensar" la diferencia de energía en forma de luz, de con longitud de onda muy precisa.

De manera que, en el juego entre luz y materia, los electrones absorben energía luminosa para saltar a niveles superiores de energía, o emiten luz cuando saltan a niveles inferiores de energía.

Sin embargo, para entender el juego del "salto de nivel" en el que participan los electrones, nos hace falta una clave: conocer la tendencia natural de los electrones. ¿Saltan por aquí y por allá, de un nivel de energía a otro, siguiendo quién sabe qué azar? Para nada. Los electrones, como cualquiera, procuran estar en un nivel de energía mínimo, y tienden a ubicarse en el nivel de energía más bajo posible. ¡Sin embargo, no todos los niveles de energía hay suficiente espacio para todo el mundo! Cada nivel puede recibir cierto número de electrones, pero ninguno más. Es una de las consecuencias del principio de Pauli.[4]

[3] La relación que propone Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico y generalizado por Louis de Broglie para fundar la mecánica cuántica se expresa energía=constante dividida entre la longitud de onda. En resumen: W = hc/ l De este modo, a cada longitud de onda le corresponde una energía bien definida.

[4] El principio de exclusión propuesto por el físico alemán Pauli dice que dos electrones no pueden encontrarse en el mismo estado cuántico (cf. capítulo II).

Una vez lleno, el nivel de energía no acepta electrones adicionales. El último en llegar tendrá que encontrar refugio en un nivel superior —si acaso éste no se encuentra completo— y así sucesivamente.

Se comprende mejor el comportamiento del electrón: aprovecha la energía que absorbe de la luz para saltar a un nivel de energía superior al que posee normalmente. Se dice entonces que se encuentra en un "estado de excitación", fuera de su "estado fundamental". Este estado no es estable, de modo que el electrón caerá de nuevo en su nivel normal en forma natural. Esta pérdida de energía se traducirá en la emisión luminosa de un color bien definido.

Los saltos de energía del electrón y la emisión de luz están, en consecuencia, íntimamente ligados. Cada uno de los diferentes elementos químicos posee una escala particular de niveles de energía. Cada elemento posee, por lo tanto, una serie de colores específicos cuyas emisiones luminosas resultan de los saltos entre los diferentes niveles de energía. Los espectros luminosos son la traducción concreta de los niveles de energía, y cada uno constituye la huella de un elemento químico, con un espectro óptico característico que permite identificarlo.

Como es de imaginarse, no se dejó escapar esta oportunidad y se estudió y documentó cada uno de los espectros ópticos de los elementos químicos, con lo cual se dispuso al fin del catálogo de "huellas digitales" de cada elemento químico.

Espectroscopía

Por otra parte, tan pronto se reconoce esa huella al descomponer la luz (con un prisma), es posible identificar el elemento químico correspondiente y medir su cantidad. A partir de este principio se desarrollará la espectroscopía.

Desde luego que, al existir varios elementos químicos, el espectro se vuelve complejo y su análisis se complica. Sin embargo, con paciencia y astucia se llegan a identificar todos los elementos químicos presentes. Incluso se llega a medir en qué cantidad están presentes por medio de la intensidad relativa de sus rayos característicos.

Así es como, mediante un aparato que descompone la luz (de modo más eficiente que el prisma de Newton) y que se coloca en el telescopio mismo, se ha podido analizar la composición química del Sol, de las estrellas, y luego de galaxias cada vez más lejanas. Luz maravillosa que al cruzar los espacios congelados del universo porta en su seno la composición química de la estrella que la emite. ¡He ahí un

resultado impresionante de la óptica cuántica! Sin embargo, llegará aún más lejos.

Moléculas y luz

Las moléculas, compuestas de varios átomos, son en sí mismas objetos cuánticos. Al igual que los átomos, poseen niveles de energía en los cuales se colocan los electrones y, como en los átomos, los electrones pueden saltar de un nivel a otro mediante la absorción o la emisión de luz.

Sin embargo, presentan varias diferencias fundamentales en relación con los átomos.

En primer lugar, los niveles de energía, su configuración y su espaciamiento dependen de la estructura de la molécula (en cadena, en codo, en anillo...). Cada molécula posee una distribución particular de niveles de energía, por lo cual cada una posee una huella "luminosa" específica. Así, el estudio de la luz que absorbe una molécula permite reconstituir su geometría, su forma, su estructura. Claro está que para llegar a establecer tales características se tuvo que calcular, medir, comparar, imaginar, pero en la actualidad se cuenta con reglas, fórmulas y catálogos, que son valiosas herramientas para los químicos. La espectroscopía permitirá descifrar las estructuras de las moléculas conforme se vayan descubriendo.

La segunda diferencia con los átomos radica en que los niveles de energía son mucho más numerosos, más cerrados, menos precisos. De ahí que el espectro no esté constituido por rayas finas y bien definidas, sino por bandas, por rayas gruesas. Además, no se encuentra en el espectro de luz visible, sino en "regiones" invisibles a simple vista y que llamamos infrarrojas o de radio.[5] Su apreciación requiere de técnicas un poco más complejas que las empleadas para los átomos, si aunque sus principios son los mismos. Esas técnicas de espectrometría molecular resultan insustituibles tanto para los químicos como para los bioquímicos y los astrónomos.[6]

[5] Los rayos electromagnéticos, que son "vibraciones de naturaleza extraña", incluyen, yendo de las longitudes de onda más cortas a las más grandes, los rayos gamma g (emitidos durante la radiactividad), los rayos x, los ultravioletas, la luz visible, los infrarrojos y las ondas de radio. Para cada tipo de longitud de onda, los detectores son diferentes, están adaptados. Por ello la tecnología de radio no tiene nada que ver con la teconología de los rayos x, aun cuando la naturaleza de los fenómenos sea la misma. Todos estos rayos obedecen a las ecuaciones de Maxwell.

[6] Veremos que gracias a estas técnicas se descubrieron las moléculas interestelares.

Láser

El segundo gran descubrimiento de la óptica cuántica es el láser, acrónimo que significa *Light Amplification by Stimulated Emissions of Radiation* (Amplificación de luz mediante emisiones inducidas de radiación).

Cuando encendemos una bombilla eléctrica para la iluminación casera, técnica con la que Thomas Edison hizo una fortuna, la luz emitida es "incoherente": cada átomo vibra en forma independiente de los demás. Los electrones saltan de un nivel de energía a otro sin ninguna sincronía entre ellos, en la más completa anarquía.

Un láser, por el contrario, se basa en la propiedad que tienen los átomos en excitación de emitir luz de manera coherente. ¿Cómo se logra esa coordinación? El principio se encuentra en un trabajo de Einstein (¡uno más!) sobre la emisión de luz inducida (¡de 1917!). A partir de los trabajos de Bohr se sabe que, en general, al cabo de cierto tiempo de que un electrón se encuentra en un nivel de energía "excitado" termina por volver a su nivel de base emitiendo luz. No obstante, Einstein demostró que si se "ilumina" un electrón excitado con la longitud de onda apropiada, lo que ocurre es que se acelera el retorno a su nivel fundamental sin modificar la luz que lo "ilumina." Se obtiene así el asombroso resultado de tener, "a la salida," una "doble luz": la que sirvió para iluminar y la emitida por el salto del electrón. Ahora bien, las dos luces se encuentran exactamente en fase, es decir, vibran al unísono; se trata de un efecto puramente cuántico que durante treinta años quedó sin aplicación.

Supongamos que se descubre la forma de que todos los electrones pasen de un átomo a una órbita exterior al mismo y que se logra dejarlos ahí cierto tiempo. Se coloca a la mayoría de los electrones en un "estado de excitación". En seguida se ilumina al átomo con una longitud de onda apropiada, de manera que todos los electrones caigan al mismo tiempo en la órbita inferior y al hacerlo emitan una luz en fase con la luz incidente. Esta luz que emiten hará que a su vez los electrones de los átomos adyacentes caigan en "estado de excitación", siempre en sincronización, etc. De este modo la luz se ampliará en virtud de esta coordinación de los saltos cuánticos y se obtendrá una poderosa emisión coherente de luz. Esto es lo que constituye el láser, uno de los inventos más espectaculares del mundo moderno.

Para llegar a ello se requería aún saber cómo poner en "estado de excitación" a un gran número de electrones de átomos, lo cual se logró gracias a la técnica llamada de succión óptica, descubierta hacia los años cincuenta por Alfred Kastler y Jean Brossel en su laboratorio

de la Escuela Normal Superior de París. Diez años después, Charles Townes, quien ya en ese entonces había inventado la emisión inducida coherente para las ondas de radio e intentaba afanosamente aplicarla a la luz, fue a París a estudiar durante seis meses la succión óptica. Seis meses después de su regreso a Estados Unidos, inventa el láser.

A partir de entonces, el láser invade la actividad de los laboratorios, los hospitales, las fábricas, el ejército, e incluso de los músicos y melómanos, hasta convertirse en la técnica básica de la física y la industria modernas. De este modo, gracias al láser, se transmiten señales mediante cables ópticos, se mide la distancia de la Tierra a la Luna, se operan cataratas o se enfrían las vibraciones de los átomos hasta casi aproximarse en millonésimas de grado al cero absoluto. Por no hablar de la optrónica, es decir, la combinación del láser con la electrónica, que tal vez constituirá el día de mañana el medio privilegiado para trasmitir información: a través de cable óptico para las grandes distancias, o en el interior mismo de las computadoras para aumentar su rapidez de ejecución.

Electrodinámica cuántica

El estudio de la interacción entre la luz y la materia ha permitido el surgimiento de un método teórico en extremo poderoso: la electrodinámica cuántica. ¿En qué consiste ese método?

Una vez que Einstein explicó el efecto fotoeléctrico y que Bohr usó los espectros de emisión óptica para construir su modelo de átomo, se comprendió que existían relaciones importantes entre los átomos y la luz. Sin embargo, se hacía uso de ellas en forma empírica, sin ningún resultado teórico profundo. La mecánica cuántica hablaba de ondas y de fotones en lo que se refería a la luz, pero no incluía en su formalización las ecuaciones de Maxwell que describían el electromagnetismo.

¿Cuáles son exactamente los mecanismos que rigen las relaciones entre luz y electrones? ¿De qué manera absorben luz los electrones para cambiar de nivel de energía? ¿Cómo pueden emitir luz cuando caen en un nivel de energía inferior? Dar respuestas a estos problemas fundamentales y luego sintetizarlas fue el trabajo de cuatro físicos: Tomonaga, Schwinger, Feynman y Dyson, quienes poco después de la segunda Guerra Mundial inventarán la electrodinámica cuántica.

Este modelo recurre a formas de cálculo extrañas, como la idea de hacer retroceder en el tiempo a las partículas para efectuar intercepciones "anticipadas", o la de impedir que las magnitudes se vuelvan

infinitas cuando se las divide entre cero.[7] No obstante, gracias a esos métodos que el mismo Feynman calificara de "estrafalarios", se obtuvieron resultados sorprendentes, como el cálculo de la magnitud física medida con una precisión de siete cifras después del punto. Citemos el ejemplo clásico: el experimento mide el momento magnético del electrón y determina 1.001 159 652 21; la teoría lo calcula y obtiene 1.001 159 652 46. ¿No es increíble?[8]

Dejemos de lado a quienes han querido deducir de este método de cálculo interpretaciones filosóficas sobre la naturaleza de los fenómenos microscópicos, y seamos, como Richard Feynman, más modestos y pragmáticos: conformémonos con ratificar que esa técnica de cálculo "funciona bien", incluso podría decirse que muy bien.

La física de los sólidos

El estudio de los sólidos intriga a los físicos desde hace mucho. Faraday demostró que ciertos sólidos son conductores de electricidad y otros no. Se investigaba la naturaleza precisa de los imanes naturales. ¿Cuáles eran sus relaciones con las teorías de Ampère y Maxwell? Ciertos sólidos son transparentes; otros, negros y opacos, y otros incluso de color. ¿Cuáles son los mecanismos que gobiernan las relaciones entre luz y materia sólida? En resumen, habría suficientes problemas para apasionar a buen número de físicos.

¿Pero cómo abordar los problemas relacionados con los sólidos? Un sólido está constituido por miles de millones de átomos unidos unos a otros, distribuidos según una configuración precisa y estable. Cada átomo puede vibrar en torno a su posición de equilibrio, pero sólo puede desplazarse con un movimiento conjunto, de deformación o de ruptura. Si se desea estudiar el comportamiento de un átomo de sólido y de sus electrones, sólo se podrá hacerlo estudiando todos los vínculos y las interacciones que tiene con sus vecinos, es decir, con los miles de millones de átomos que obedecen a la mecánica cuántica. Si de por sí se tuvieron muchas dificultades para calcular las soluciones de la ecuación de Schrödinger para los átomos aislados, y después para las moléculas más simples, ¿cómo esperar que se resuelva el problema con miles de millones de átomos?

Esta pregunta tiene dos respuestas: simetría y estadística.

[7] *Cf.* el librito de Richard Feynman, *Lumière et Matière*, París, Interéditions, 1987, que narra y explica en un lenguaje accesible a todos la aventura de la electrodinámica cuántica.

[8] De hecho, se demostrará que hay un error tanto en la medida experimental como en el cálculo, y que su acuerdo es aún mejor.

El uso intensivo de los rayos x para estudiar la estructura de los sólidos, realizado tanto por el equipo de Munich en torno a Max Von Laue como por el de Cambridge en torno a Bragg, permitió poner en evidencia un hecho fundamental: las simetrías que se habían observado entre las superficies de cristales naturales, a las cuales debían su belleza, no eran más que consecuencia de simetrías en la distribución de los átomos. Ahora bien, incluso si muchos de los sólidos no presentan a simple vista superficies planas, su estructura atómica obedece también a las reglas de la simetría.

En todos los sólidos, los átomos (o las asociaciones de algunos átomos) se distribuyen de forma regular, de acuerdo con una periodicidad casi perfecta. Como en un papel tapiz, los motivos se repiten con regularidad, según una simetría bien establecida. Pero en este caso se trata de un "papel tapiz" no en dos dimensiones, sino en tres, y el espaciamiento entre los motivos no es de más de 10 millonésimas de centímetro. A esto se le llama la red atómica.

Estas propiedades de simetría son las que inducirán a los físicos a lanzarse a la aventura.

Sólidos "premecánicos-cuánticos"

Los dos primeros intentos serán bastante tímidos. Aunque siguen el principio del enfoque microscópico, no usan la utilería "a la Schrödinger". Se trata del estudio de las propiedades térmicas de los sólidos realizado por Einstein (metido en todo) y después por Debye. Si se sabe que para aumentar en 1°C la temperatura de un gramo de agua se requiere darle una caloría, ¿qué cantidad de calor se debe proporcionar a un gramo de sólido para aumentar en 1°C su temperatura? Dos químicos, Dulong y Petit, afirmaban que la capacidad calorífica de los sólidos era constante. Ahora bien, a partir de que se tomaron medidas a bajas temperaturas, se confirmó que la ley tenía numerosas excepciones.

Cabe recordar que la temperatura es la medida de agitación de los átomos; por ello, lo que se estudiará es de qué manera un conjunto de átomos situados a distancias fijas pueden vibrar, agitarse en torno a su posición de equilibrio. Con este propósito, Einstein recurre a las leyes de distribución microscópica de la energía formuladas por Boltzmann, utilizando la cuantificación de la energía que debemos a Planck. Einstein muestra, mediante el simple cálculo estadístico, que la capacidad calorífica de los sólidos es constante, pero sólo a altas temperaturas. A bajas temperaturas, tal capacidad varía, resultado que concuerda

con la experiencia. P. Debye mejora el modelo, aunque sin cambiar en realidad su naturaleza.

Con la misma idea se estudia un segundo problema: el del magnetismo. El francés Pierre Weiss y más tarde su alumno Louis Néel lo abordan a partir de una idea sencilla: el electrón que gira alrededor del núcleo del átomo está constituido por una pequeña corriente eléctrica. Según la teoría de Ampère, la corriente crea, como resultado, un campo magnético. Si se reúnen de manera apropiada los átomos de ciertos elementos químicos, ¿por qué esos minúsculos campos magnéticos no habrían de sumarse para formar un campo magnético mayor, fácilmente medible? A partir de una serie de consideraciones de simetría y de cálculos ingeniosos, Weiss primero y después Néel elaborarán la teoría del magnetismo de los sólidos; describen sus propiedades, su diversidad y sus variaciones en este campo.

La teoría de las dislocaciones es el tercer enfoque en el estudio de las propiedades de los sólidos que excluye todo recurso a la mecánica cuántica. En un cristal, los átomos se organizan respetando una periodicidad bien definida. Sin embargo, de vez en cuando tal periodicidad no se respeta, tiene "defectos." En particular, llega a faltar un semiplano atómico. Tres hojillas se transforman en dos hojillas. El límite brusco se representa con una línea llamada "dislocación". Se trata de una falla lineal (en oposición a los defectos puntuales que afectan a un solo átomo). Bajo la influencia del grupo de Bristol, en especial de Charles Frank, se estudiarán las propiedades de estas dislocaciones, la manera en que se forman, la manera en que "se desplazan" dentro de un cristal, etc. A partir de ello se podrá explicar cómo y por qué se deforman los metales, estudiar los que se rompen, los que son maleables o plásticos, los que son resistentes, los que son flexibles o elásticos. Nace entonces una disciplina que se llamará metalurgia física.

Pero estamos todavía empapados en el mundo precuántico. No entramos aún al extraño mundo donde se habla del principio de incertidumbre, de las probabilidades de ubicación del electrón, del principio de exclusión de Pauli, etc. Ese umbral se franqueará cuando se combinen la mecánica cuántica con la física estadística.

La mecánica cuántica permitirá definir la distribución de los niveles de energía en el sólido, considerado en conjunto como una entidad del mundo cuántico y no como una suma de átomos. La física estadística cuántica describirá los movimientos del gas de electrones en este entramado tridimensional de átomos, considerando las posiciones respectivas de los núcleos de los átomos, las interacciones de los átomos y, desde luego, las reglas cuánticas.

Bandas de energía

El gran resultado clásico de la mecánica cuántica aplicada a los sólidos se debe al físico suizo Félix Bloch: en un sólido, ya no se habla de niveles de energía de los electrones, sino de bandas de energía. Antes se hablaba de bandas para las moléculas. En el caso de los sólidos, tales bandas son mucho más extensas. En la escalera de energía, los "peldaños" tienen un gran espesor. Se encuentran siempre separados por intervalos prohibidos, pro como su campo es más amplio, resulta *a priori* menos restringido. Mientras que el electrón de un átomo sólo puede recibir energía luminosa cuando ésta corresponde exactamente al intervalo que separa dos niveles de energía, los electrones de los sólidos pueden recibir energía luminosa en una banda más amplia de longitudes de onda.

Un sólido transparente posee bandas de energía separadas por un intervalo que excede el espectro óptico. Ningún "color" posee energía suficiente para hacer saltar un electrón externo a un nivel excitado. La luz entra y sale del sólido sin modificación, de ahí su transparencia. Un sólido opaco tiene, por el contrario, bandas de energía "externas" amplias y muy cercanas. La banda excitada está libre. El sólido, en consecuencia ,absorberá todas las longitudes de onda de la luz y utilizará esta energía para hacer pasar sus electrones a la banda excitada. El sólido que absorbe toda la luz es negro, de manera que el cuarzo es transparente y el óxido ferroso es oscuro.

Los conductores y los aislantes de la electricidad descubiertos por Faraday se explicarán de manera análoga. La corriente eléctrica es el resultado palpable del movimiento de electrones, tal como lo había descrito Lorentz. En un aislante, la banda de energía superior está llena de electrones y está separada de la banda de energía excitada por una energía considerable. Así, los electrones se hallan bloqueados en su banda; el sólido no puede conducir la corriente eléctrica. No hay movilidad en el electrón, no hay corriente eléctrica. Los electrones se solidarizan con sus átomos de origen. En un conductor, por el contrario, las bandas de energía se superponen y no se llenan por completo. Con ayuda de un poco de energía, proporcionada por un potencial eléctrico (voltios, como se dice normalmente), los electrones pueden pasar por la parte vacía de la banda y así circular. Esta circulación de electrones sólo se ve obstaculizada por la agitación de los átomos, debido a lo cual los electrones pierden un poco de energía y calientan (agitan) los átomos. Esto es lo que llamamos resistencia eléctrica. Es lo que sucede con los metales. Los electrones se encuentran tan libres

que dejan de pertenecer a un átomo en particular, se vuelven comunes a todo el sólido. El "gas de electrones" podrá así conducir la corriente eléctrica.

Con un poco de atención, podría haberse confirmado que el color y la conductibilidad eléctrica pueden explicarse de manera similar. En efecto, los aislantes en general son blancos o transparentes, y los conductores oscuros y opacos o de brillo metálico. Esto no es casual.

Tal propiedad, por supuesto, podrá utilizarse industrialmente dentro del área que se llama optrónica.

Hemos visto que los estudios sobre la conductibilidad de los sólidos van a desembocar en un descubrimiento fundamental: el de los semiconductores, sobre los cuales ya hablamos, a propósito del transistor.[9] ¿Qué es un semiconductor en la problemática de las bandas de energía? Es un aislante —dos bandas de energía separadas por un gran intervalo— que contiene las impurezas, las cuales crean niveles de energía en el intervalo entre las dos bandas. Estos niveles son entonces los peldaños de escalera que los electrones podrán utilizar para alcanzar el inaccesible nivel de energía excitado en el que podrían desplazarse. En un semiconductor, las impurezas permiten a los electrones tomar un atajo. Pero todavía necesitan un voltaje suficiente para escaparse al nivel superior. De ahí la propiedad de los transistores de presentar fenómenos de "umbral". Como consecuencia del papel determinante de las impurezas, se podrán fabricar semiconductores al introducir de manera artificial impurezas en un aislante como el silicio. Ése es el origen de la industria de los semiconductores.

Superconductividad

El otro gran descubrimiento de la física de sólidos es la superconductividad. En 1911, el holandés Kamerlingh Onnes, campeón de las bajas temperaturas y el primero en licuar el helio a –269°C, observó un fenómeno extraño. Cuando se lleva a –269.2°C, el mercurio conduce la electricidad sin oponer resistencia, sin disipar calor, es decir, sin gasto de energía. Este descubrimiento extraordinario abre posibilidades industriales enormes; por ejemplo, la posibilidad de almacenar energía eléctrica haciéndola circular indefinidamente, e incluso transportarla sin pérdida a través de grandes distancias. ¡Un sueño para la compañía de luz!

Después de Onnes, se realizarán enormes esfuerzos para explorar

[9] Véase el capítulo III, donde se explica con mayor detalle el descubrimiento y operación del transistor.

más a fondo este sorprendente campo. Se descubren otros superconductores: el plomo y el estaño, por ejemplo; pero ninguno de ellos presenta esa "interesante" propiedad más que cuando llegan a cerca del cero absoluto. Ahora bien, enfriar el helio cuesta caro... ¡en términos de energía!

Sin embargo, los superconductores poseen propiedades en verdad fascinantes. Por ejemplo, si se aproxima un pequeño imán por encima de un superconductor, éste flota en el aire, como suspendido por levitación. La razón es simple, como había descubierto Ampere: un campo magnético genera una corriente eléctrica, pero ésta crea a su vez un campo magnético; como en este caso no hay pérdida de energía, los dos campos magnéticos se anulan.

La explicación de la superconductividad será proporcionada por los estadunidenses Bardeen, Cooper y Schrieffer.[10] En ella interviene un proceso típicamente cuántico, es decir, muy misterioso para el sentido común. Se trata de los "pares de Cooper". En ciertos casos muy específicos, dos electrones que portan cargas negativas pueden formar una pareja cuyas velocidades son opuestas, de manera que la suma de sus velocidades es cero. Con ello se demuestra que una infinidad de estos ensambles pueden conducir corriente sin resistencia gracias a la suma de los pequeños desplazamientos coordinados de estos electrones. La teoría explica por qué los superconductores sólo operan a bajas temperaturas: es una condición (¡eminentemente cuántica!) para que hagan su aparición los pares de Cooper.

Pese al "obstáculo del frío", los superconductores se han empleado en diversas aplicaciones industriales, siendo la más conocida el llamado SQUID (siglas de *Superconducting Quantum Interference Device,* Dispositivo Superconductor de Interferencia Cuántica), que consiste en un transistor que queda atrapado entre dos materiales. Se trata de una sucesión de capas superconductor/aislante/superconductor. Este objeto cuántico permite medir los campos magnéticos con extraordinaria precisión y sensibilidad. Gracias a él, se han podido detectar los campos magnéticos que produce el cerebro humano —con lo que se abren nuevos horizontes en la neurología—, así como detectar el magnetismo de las bacterias y rastrear la deriva de los continentes grabada en las rocas.

La física de sólidos, de la cual hemos dado aquí sólo una idea muy general, cautivará a los físicos durante un periodo de 15 años. Junto con los descubrimientos fundamentales de los que hemos hablado —a los que añadiríamos la superfluidez del helio líquido, ya que se ha ser-

[10] Bardeen obtuvo un primer premio Nobel por el descubrimiento del transistor; obtendrá otro por su explicación sobre los superconductores.

vido de los mismos métodos de enfoque—, esta disciplina se encuentra en la base de la revolución electrónica y, a partir de ésta, de la revolución informática. En Francia tuvo un vigoroso desarrollo gracias a dos jefes de equipo excepcionales, Jacques Friedel y Pierre Aigrain. En 1970, la mitad de los físicos del CNRS *(Centre National de la Recherche Scientifique, Centro Nacional de Investigación Científica)* eran físicos del estado sólido.

Defectos

En el plano "filosófico", lo fascinante del estudio de los sólidos es la importancia que otorga a los famosos "defectos", accidentes del orden perfecto o pequeños desórdenes locales.

Un cristal en estado de equilibrio, salvo cuando se encuentra a una temperatura de cero absoluto (–270°C), forzosamente presenta "defectos", ya que su periodicidad no es perfecta. El "papel tapiz" microscópico está "roto" en algunas partes. Estos defectos son o bien específicos —como en los casos en que un átomo no está en el lugar "correcto", el que le correspondería según la simetría—, o bien se presentan como conjuntos que llamamos dislocaciones. Los defectos tienen un papel esencial en la deformación del sólido, en su semiconductividad, en su superconductividad y en muchos otros aspectos más. ¡No hay transistores sin defectos! Si bien el orden (la simetría) permite el estudio de los sólidos, los defectos dan riqueza a su comportamiento.

Finalizaremos este rápido recuento del mundo cuántico con la exploración del núcleo, capítulo que se desarrolló casi por completo a fines del siglo XX.

El núcleo de la "preguerra"

El descubrimiento del núcleo del átomo data, como sabemos, de 1911.

Lo realizó el gran Ernest Rutherford, valiéndose de experimentos sumamente elegantes. Se sabía desde esa época que el núcleo era muy pequeño (¡no medía más de un metro de diámetro en un átomo de 100 kilómetros de radio!), pero contenía casi la totalidad de la masa del átomo. Se sabía también que tenía una carga eléctrica positiva (mientras que los electrones que ocupan el espacio del átomo la tienen negativa). Al principio se creía que se trataba de una partícula única; después se pensó que era una mezcla de protones y electrones. Al descubrir el neutrón en 1932, Chadwick, discípulo de Rutherford, mostró que el núcleo estaba compuesto de dos partículas: el neutrón y

el protón, casi idénticas; sin embargo, una de ellas es neutra mientras que la otra está cargada positivamente. En la misma época se demuestra que el núcleo no contenía ningún electrón y que, por lo tanto, el neutrón no era simplemente un protón más un electrón. Como J. J. Thomson y Aston ya habían dado a conocer desde 1910 la existencia de "variedades" con masas diferentes en un mismo elemento químico, se recurrió a la noción de isótopos. (Dos isótopos de un mismo elemento son dos variedades de átomos que poseen idéntico número de protones —y, en consecuencia, de electrones— pero que difieren en el número de sus neutrones).[11] A partir de ese momento se plantearon dos cuestiones fundamentales: ¿Cuál es la fuerza que asegura la cohesión del núcleo? ¿Cuál es el pegamento misterioso que mantiene juntos a varios protones cuando, por estar todos cargados positivamente, deberían rechazarse y hacer estallar el núcleo? En suma, ¿cuál es la naturaleza del protón y del neutrón: son las últimas partículas de la materia, o son conjuntos de partículas más pequeñas?

Se creía que el átomo era el último componente de la materia, pero se descubrió que en el corazón del átomo se encontraba el núcleo y, después, que el núcleo mismo estaba formado por partículas, neutrones y protones. ¿Y si estas partículas fueran en sí mismas complejas, compuestas de subpartículas que llevaran la división elemental de la materia todavía más lejos, a lo infinitamente pequeño?

Antes de la segunda Guerra Mundial, se desconocían las respuestas a estas preguntas. Es verdad que se habían realizado algunos ensayos tímidos, con bosquejos de cálculos, pero el tratamiento teórico del núcleo había resultado más difícil que el del átomo. Además, los experimentos eran arduos: para abrir los núcleos se requería mucha más energía que para estudiar la nube de electrones. Sin embargo, se habían recopilado algunas observaciones interesantes, en particular durante 1932. Además del neutrón descubierto por Chadwick, Carl Anderson dio a conocer el positrón, o electrón positivo, en los rayos cósmicos (desconocía Anderson que Dirac ya lo había predicho a partir de consideraciones teóricas). Estos dos descubrimientos les "faltaron" a Irène y Frédéric Joliot, quienes a pesar de ello fueron, según Rutherford, los investigadores experimentales más brillantes de su época.[12] Con su espectrómetro de masas, Aston había demostrado que la existencia de isótopos era un lugar común en el caso de ele-

[11] Antes del descubrimiento del neutrón, se creía que en el núcleo existían protones y electrones y, por tanto, que los isótopos diferían en el número de protones y electrones situados en el núcleo.

[12] Fréderic e Irène Joliot habían desarrollado en París fuentes de radioactividad sumamente poderosas que les permitían realizar experimentos de mejor calidad que a Rutherford en

mentos más pesados que el oxígeno. Harold Urey descubrió el deuterium, isótopo del hidrógeno, en el núcleo constituido por un protón y un neutrón. Después, Irène y Frédéric Joliot descubrieron la radioactividad artificial, lo que les valdría un premio Nobel bien merecido.

En el plano teórico, Bohr había aportado algunas ideas de gran importancia, Fermi había comenzado a estudiar la radioactividad ß y lo que más tarde se llamaría la "fuerza débil". Yukawa, un joven japonés, había planteado la idea de que las fuerzas nucleares, que mantienen juntos a protones y neutrones, eran resultado de un intercambio de partículas. Con todas estas aportaciones, era difícil ver claro; el núcleo parecía mucho más renuente a la exploración que el átomo.

La bomba

En 1939, mientras el ruido de las botas invadía Europa, se descubre la fisión del átomo. Este descubrimiento se produce en condiciones excepcionales.

En Alemania, Otto Hahn (otro discípulo de Rutherford) logra bombardear con neutrones el uranio, y al término del experimento obtiene una serie de núcleos extraños. No entiende bien a bien lo que acaba de ocurrir. Con naturalidad, llama por teléfono a Lise Meitner, quien había sido su colaboradora durante 15 años y se encontraba refugiada en ese momento en Suecia, perseguida en Alemania por el antisemitismo hitleriano. Lise Meitner (la "Marie Curie alemana", como se le conocía en ese entonces), con la ayuda de su sobrino Otto Frisch, explica lo que se produjo: Otto Hahn acaba de fragmentar en mil pedazos el átomo del uranio al bombardearlo con neutrones.

Meitner le propone a Hahn varias pruebas, que resultan exitosas. Al término de largas conversaciones telefónicas, escriben juntos uno de los artículos más importantes de la historia humana.

La importancia indirecta de este descubrimiento sobrepasa con mucho su interés histórico. En efecto, no era un descubrimiento de poca monta saber que los grandes núcleos pueden romperse en dos partes de diferente masa (en Roma, el grupo de Fermi había hecho observaciones parecidas),[13] pero lo que resultará decisivo es la agita-

Cambridge. (Ambos murieron, por cierto, de un cáncer provocado por el exceso de radiación.) En el transcurso de sus experimentos de bombardeo de blancos, obtuvieron resultados que implicaban el descubrimiento de los antielectrones (los positrones) y después del neutrón. En los dos casos, no supieron detectarlos.

[13] Enrico Fermi y sus alumnos, entre ellos Emilio Segré, din duda "descubrieron" la fisión antes que Otto Hahn. Sin embargo, igual que en el caso de los Joliot, no supieron sacar provecho de sus resultados en otros aspectos. Tal vez por ello el mismo Otto Hahn no había comprendido bien su significado.

ción que este nuevo conocimiento va a desencadenar, al conferirle al estudio del núcleo un interés y recursos materiales extraordinarios, sin parangón en la ciencia con lo que hasta entonces se conocía.

Al difundirse el nuevo descubrimiento, numerosos físicos[14] se dieron cuenta de que esta reacción obtenida por neutrones libera por sí misma neutrones y, en consecuencia, puede propagarse en cadena y producir finalmente una explosión, pues cada fisión libera mucha energía, de acuerdo con la fórmula de Einstein. La bomba atómica surge entonces en la mente de varios físicos que, dirigidos por Albert Einstein y Leo Szilard, trabajaban en Estados Unidos y Gran Bretaña y convencieron a los políticos occidentales en funciones de iniciar la construcción de la bomba a fin de fabricarla antes que los alemanes.[15]

Esta iniciativa civil de varios sabios desembocará en el proyecto científico más ambicioso que se haya visto nunca: el proyecto Manhattan. En Estados Unidos se reunirá, en una base secreta en Los Álamos, Nuevo México, la élite técnico-científica del país, bajo la dirección del general Groves y la coordinación científica de Robert Oppenheimer. En menos de tres años, el equipo, un verdadero *dreamteam*, formado por premios Nobel potenciales o ya laureados, logrará lo imposible: construir la bomba atómica.[16]

De paso, bajo la dirección de Enrico Fermi, los estadunidenses fabricarán también la primera pila atómica, antecesor del reactor nuclear. En una pila, las reacciones de fisión en cadena se controlan de manera que la energía se disipe en forma continua y no encaminada a una explosión, como en el caso de una bomba.[17]

Como resultado, lo "nuclear" se convierte en la novedad, tanto en el plano del armamento militar como entre las nuevas fuentes de energía. Para ponderar la revolución que se desencadenó, baste recordar que todavía en 1937, año de su muerte, el extraordinario físico Rutherford, padre de todos estos descubrimientos, declaró que él creía que la humanidad jamás lograría utilizar la energía almacenada en el núcleo.

[14] Eugene Wigner, Enrico Fermi, Frédéric Joliot, James Chadwick, Victor Weiskopft.

[15] En efecto, después de la guerra se corroborrará que, a pesar de la participación estrecha de Heisenberg, los alemanes se encontraban muy retrasados en relación con el proyecto estadunidense.

[16] La primera estalla en Hiroshima el 6 de agosto de 1945. Era una bomba de uranio 235. Después, el 9 de agosto de 1945, estalla sobre Nagasaki una bomba de plutonio.

[17] En una bomba se desata una reacción en cadena que conduce a la explosión. En un reactor nuclear, se controla la reacción en cadena y no llega a "divergir." Al contrario de lo que se piensa comúnmente, es más fácil fabricar una pila que una bomba (históricamente, además, Fermi fabricó la primera pila antes que la bomba). Un reactor que se desata no puede transformarse en una bomba. De hecho, se descubrió la existencia de una "pila nuclear" natural en una mina de uranio en Oklo, Gabón, que data de 2 mil millones de años.

El proyecto Manhattan había dado a Estados Unidos un considerable avance con respecto al resto del mundo, avance que, por razones de tipo estratégico no pensaban perder. Por su parte, las demás potencias buscaban afanosamente superar su retraso. Así se fue desarrollando un clima de competencia y secreto sin precedente en torno al estudio del núcleo. La contraparte feliz de esta situación fue que este sector de la investigación se vio inundado de fondos financieros. En retrospectiva, nos podríamos preguntar cuál sería nuestro conocimiento del núcleo atómico sin la ayuda prodigiosa que se le prodigó por razones nada científicas.

Tan pronto como terminó la guerra, las investigaciones se restablecieron con gran brío, tanto en el plano experimental como en el teórico. Desde el punto de vista experimental, el enfoque del método será el que inventó Rutherford y mejoraron los Joliot: bombardear los núcleos con partículas, romperlos y observar después los resultados.

Colisiones nucleares

En el juego del "tiro al núcleo", la mecánica cuántica impone una regla de hierro: entre más partículas de dimensiones diminutas se deseen obtener, más energía habrá de emplearse. De ahí proviene la carrera sin fin por obtener energías cada vez más grandes. De ahí también el nombre que adoptará la física del núcleo: física de altas energías. Altas energías, en efecto: de dimensiones de MeV (millones de electrón voltios), de GeV,[18] etcétera.

En la primera fase de los experimentos, es decir, hacia los años 1950-1960, se oponían dos técnicas: la del laboratorio y la de las cimas de montañas.

En el laboratorio, se fabrican aparatos con el propósito de acelerar las partículas mediante el juego combinado de campos eléctricos y magnéticos. En primer lugar está el ciclotrón, inventado por el estadunidense Lawrence, y, más tarde, el acelerador de partículas.

Las cimas de las altas montañas son los lugares donde se reciben los rayos cósmicos. Estos rayos son flujos de partículas[19] que atraviesan el espacio a velocidades extraordinarias. La partícula más abundante es

[18] En física nuclear, la energía se mide en electrón-voltios (es la energía de un electrón colocado en una diferencia de potencial de un voltio, es decir, 1.603 10^{19} joules). El keV (kilo electrón voltio) = mil electrón-voltios, el MeV(mega electrón-voltios) = un millón de electrón-voltios, el GeV (giga electrón-voltios) = mil millones de electrón-voltios.

[19] El origen de los rayos cósmicos es todavía un misterio. Se cree que son partículas emitidas durante la explosión de una supernova, las cuales fueron arrojadas al espacio y aceleradas por los campos magnéticos de las estrellas como en un acelerador nuclear.

el protón, el cual, al reaccionar con los átomos de la atmósfera, da nacimiento a los neutrones. Con la ayuda de los neutrones de los rayos cósmicos se pueden provocar y, en consecuencia, estudiar las reacciones nucleares; por ejemplo, romper núcleos atómicos como se hace en el laboratorio, y observar sus fragmentos.

En esta competencia, la ventaja se inclinó un tiempo hacia los rayos cósmicos, gracias a los cuales el grupo francés de Louis Leprince-Ringuet hizo descubrimientos notables. Después los aparatos artificiales volvieron a tomar la delantera, (es necesario subrayarlo), recursos materiales considerables: anillos de aceleración de 5, 10 o 15 km de diámetro; túneles equipados con miles de imanes, es decir, una tecnología y equipos dignos de las películas de James Bond. La fotografía de colisiones entre núcleos y la detección de partes del núcleo que así se obtuvieron requerirán de cámaras gigantescas de burbujas que serán finalmente remplazadas por la cámara de filamento que inventará George Charpak. Se fotografía, se deduce, se examinan una a una las extrañas trayectorias de las colisiones entre partículas. Estos experimentos de división de partículas, que exigen presupuestos extraordinarios (diríamos militares) y que movilizan a equipos científicos de cientos de personas permiten, en un verdadero zoológico de partículas y antipartículas.

Antimateria

El primero y más espectacular resultado de la física de altas energías será la confirmación del descubrimiento de Anderson: las partículas poseen sus "contrapartes": las antipartículas, las cuales tienen la misma masa, el mismo *spin*,[20] el mismo periodo de vida de las partículas, sólo que sus cargas eléctricas son inversas. Es posible imaginar la producción de átomos, de objetos, de un universo, con las antipartículas, que actuarían de la misma manera que las partículas que conocemos. El único punto que distingue la materia de la antimateria (además de sus cargas eléctricas inversas) es que en el momento de encontrarse se anulan y emiten un flujo de energía violenta en forma de rayos electromagnéticos.[21]

De esta manera, los experimentos de división de núcleos condujeron al descubrimiento de gran cantidad de partículas y antipartículas.

[20] En la concepción cuántica "clásica", el *spin* describe la rotación de una partícula sobre sí misma. En el formalismo cuántico, constituye un parámetro abstracto que puede tomar los valores múltiples de 1/2 en negativo o positivo. Es un concepto formulado por el inglés Paul Dirac.

[21] Por el momento, en las "bombas atómicas" hay escasa reacción materia-antimateria; sin embargo, en caso de que lleguemos a dominar esta reacción, ¡se podrían producir bombas un millón de veces más poderosas que los artefactos apocalípticos actuales!

Como en la botánica, la astronomía o la geología, la tarea del "observador nuclear" consistía sobre todo en clasificar y nombrar los objetos que observaba. Con el fin de clasificarlos, toma en cuenta sus masas, sus cargas, sus periodos de vida (muchos de ellos son efímeros), su *spin*. Para nombrarlos, usa la terminación "on" en sus nombres: muones, piones, hadrones, leptones, gluones, etcétera.

De los cuantos a los quarks

En la parte teórica, las investigaciones continuaron su curso pero durante mucho tiempo resultaron infructuosas. La teoría se ve completamente rebasada por esta "zoología especial", cuyo origen no comprende. Otra tarea que la ocupa es la creación de las herramientas apropiadas, pues resulta obvio que la sencilla ecuación de Schrödinger no basta para "atacar el núcleo". Se requiere tomar en cuenta la relatividad, el electromagnetismo, en resumen, toda la teoría que se almacenó como física fundamental. De este modo, el estudio del núcleo se confundirá paulatinamente con el estudio de las fuerzas que rigen el Universo. En seguida haremos una rápida exploración de lo que constituye una de las grandes aventuras de la ciencia moderna y que ameritaría por sí misma un libro entero (véase la bibliografía).

Desde el fin de la segunda Guerra Mundial, los teóricos se preocuparon por calcular las energías que unen los núcleos, con objeto de descubrir las fuerzas en que se sustentan y de traducir la gama de propiedades de los núcleos de diversos elementos químicos de la tabla de Mendeleiev. Se trataba de responder a preguntas como éstas: ¿Por qué no existe una infinidad de isótopos para cada elemento? ¿Por qué el último núcleo que posee un isótopo no radiactivo es el bismuto? ¿Cómo calcular la energía del núcleo que se libera en las reacciones nucleares?

Los primeros enfoques consisten en "trasponer" el modelo de los átomos al núcleo e incluir capas de partículas de la misma manera en que se incluían las capas de electrones. Se descubren rápidamente los límites de este modelo y se ensaya con otro, en donde el núcleo se asemeja a una gota de líquido deformable, pero que se mantiene sólidamente cohesionado. Aunque eran interesantes y explicaban algunas propiedades, los enfoques resultaban insuficientes: no explicaban las fuerzas ni la naturaleza de los últimos componentes del núcleo. Eran al conocimiento del núcleo lo que el átomo de Bohr había sido al del átomo: un buen principio. Principio que, muy pronto, resultará insuficiente (e incluso se verá rebasado) cuando los experimentos realizados

en los aceleradores revelen la existencia de un verdadero "zoológico" de nuevas partículas.

Empieza entonces el interés simultáneo en la naturaleza de las fuerzas nucleares y en la naturaleza de las partículas observadas experimentalmente.

En lo que respecta a las fuerzas nucleares, el físico japonés Yukawa había abierto el camino desde antes de la segunda Guerra Mundial, al establecer la hipótesis de que el "vínculo" podría crearse con intercambios especializados. La idea de Yukawa fue profética, aun cuando la naturaleza de los intercambios entre partículas haya resultado más compleja. Ahora bien, se sabía que en el núcleo existían dos tipos de fuerzas muy específicas: la fuerza nuclear fuerte, encargada de la cohesión del núcleo y resultado de la repulsión mutua entre los protones (todos cargados positivamente), y la fuerza nuclear débil, encargada de la radioactividad beta ß, como ya lo había Fermi comprendido. ¿Cómo explicar estas fuerzas?

Se recurre también al método de la electrodinámica cuántica, método algo extraño pero que permite cálculos variados con una precisión extraordinaria. Los teóricos se vuelcan en esta línea; entre los pioneros cabe mencionar a Bethe, Weiskopft y Schwinger. Su idea se basa en que las leyes de la naturaleza están dominadas por la simetría. Un poco a la manera de Platón, los teóricos de las partículas basaban su trabajo en la convicción de que existen simetrías profundas en las leyes de la naturaleza, simetrías que aparecerán en sus ecuaciones.

Inspirándose en estas dos ideas, los teóricos ahondarán en la electrodinámica cuántica y en la relatividad para aclarar una situación que hasta entonces parecía muy desordenada. Tras muchas peripecias, sus esfuerzos los conducirán a proponer el modelo de los quarks,[22] que en la actualidad es aceptado por todos los especialistas.

Dicho modelo plantea que la materia está formada por partículas extrañas, los quarks, descubiertos por Murray Gell-Mann y George Zweig, que sólo existen asociados a otros quarks, encerrados en partículas más grandes, los nucleones.[23] Los quarks están unidos entre sí por partículas no menos extrañas: los gluones. El protón está formado por tres quarks; el neutrón también, pero se trata de quarks diferentes. Los nucleones están unidos entre sí por los mesones para formar

[22] Quark no es un acrónimo; es una palabra sacada por Murray Gell-Mann de una novela de James Joyce, *Finnegans Wake*, en la que se habla de "*three quarks for Muster Mark*" (tres quarks para el Suñor Mark). El modelo no fue muy bien aceptado en 1964. Uno de los coautores, George Zweig, escribió que cuando fue propuesto para una plaza de profesor, uno de los grandes teóricos de la época logró que lo eliminaran argumentando que los "quarks" eran el trabajo de un charlatán. Véase *Quarks*, de Harold Fritzsch, Nueva York, *Basic Books*, 1983.

[23] El protón y el neutrón son nucleones.

el núcleo. Si se busca extraer de los nucleones los quarks, éstos desaparecen al reaccionar con sus contrarios, sus antipartículas. Se dice que los quarks están confinados, que jamás podrán estar libres aisladamente. Por eso es imposible observarlos directamente; sólo se detectan sus efectos indirectos. Sin embargo, son ellos, omnipresentes e invisibles, los que fundamentalmente constituyen la materia.

En cuanto a las fuerzas nucleares, ¿cuál es su naturaleza? Parecen resguardar ese misterio tanto las interacciones fuertes, que mantienen la solidez del núcleo, como las interacciones débiles.

Cromodinámica cuántica

En el nivel del núcleo, estas fuerzas se asocian a las "partículas" que las "llevan". Se ha identificado a las que son responsables por las fuerzas nucleares: en el caso de la fuerza fuerte, se trata del gluón; en el de la débil, del mesón. En consecuencia, existen en el Universo cuatro fuerzas fundamentales: la gravitación, el electromagnetismo, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil. Mientras buscan la explicación a las fuerzas del núcleo, los físicos de las partículas se dedicarán a examinar las relaciones que existen entre estas diferentes fuerzas.

A fin de lograr este objetivo, los teóricos desarrollaron una novedosa teoría matemática llamada cromodinámica cuántica, lo que les permitió seguir progresando. De paso, fue necesario atribuir "cualidades" novedosas a las partículas, así que se dotó a los quarks de un "color", un "sabor" y un "atractivo", atributos cuyas correspondencias físicas no se conocen muy bien.

Estos enfoques abstractos, supramatemáticos, que se basan en la elegancia, la belleza y la simetría, resultan difíciles de comprender para los profanos. Es posible "prever" una partícula al cambiar el signo de una ecuación o al observar las "fallas" de una supuesta simetría. Se predice el resultado de un experimento al recurrir a un teorema matemático. Este mundo de las partículas parece ser el último refugio de Platón. Pero no es así. No cabe duda de que ciertos teóricos se siguen inspirando en impulsos platónicos, pero no es ése el aspecto más importante, pues el conjunto de la disciplina se somete a la prueba única de la verdad científica: el experimento. Mientras exista este ir y venir entre la teoría y la experimentación, nos mantenemos en el terreno de la ciencia.

[24] El *supercollider (supercolisionador)* lo mismo que el LCH *(Large Hadron Collider,* Gran colisionador de hadrones) son aceleradores de partículas de la nueva generación. Su costo es de varios miles de millones de francos. El *supercolisionador* estadunidense iba a establecerse en Texas, pero se abandonó su construcción.

Hay quienes dicen que tales teorías son tan abstractas que no se vinculan con nada. Recordemos que este tipo de objeciones se hicieron sucesivamente a las acciones a distancia de la gravitación de Newton, al "éter" del electromagnetismo de Maxwell y a las probabilidades de presencia de la mecánica cuántica de Schrödinger.

Parece que la física tiene la vocación de inventar modelos abstractos para explicar lo concreto.

Ello no impide que algunos se planteen preguntas. ¿La naturaleza es simétrica o es la simetría la que permite resolver las ecuaciones que intentan representarla? Me resulta difícil responder, ya que desconozco el significado exacto de todos esos cálculos. Lo que sí sé es que los físicos teóricos invirtieron desde entonces el proceso de intercambio con los experimentales: mientras que antes los teóricos corrían tras los experimentos para tratar de explicar el "zoológico de partículas", ahora vienen con los experimentales a verificar sus predicciones. ¡Y, en apariencia, funciona! La cromodinámica cuántica es a partir de entonces un modelo predictivo, una guía para la experimentación.

Los teóricos afirman, asimismo, que han llegado a unificar tres de las cuatro fuerzas de la naturaleza: las interacciones nucleares fuertes y débiles, así como la fuerza del electromagnetismo. La unificación entre la fuerza débil y la fuerza electromagnética les valió un premio Nobel a Abdus Salam, Sheldon Glashow y Steven Weinberg. Sólo la fuerza de gravitación, que Newton puso de manifiesto, se resiste aún la unificación.

Las cuerdas

Para tratar de unificar los dos tipos de fuerzas, la gravitación y el electromagnetismo, para reunir, en suma, a Newton y a Maxwell, los teóricos de la física han puesto en práctica un nuevo ensayo. En vez de considerar a las partículas elementales como "puntos" o "canicas" minúsculas, suponen que estas partículas tienen forma de hilillos, de cuerdas. Minúsculas, estas cuerdas vibran y poseen propiedades interesantes; se las puede cortar, pegar, juntar, etc. Estas cuerdas, y posteriormente, estas supercuerdas, ¿permitirían explicar el universo? Nos situamos entonces en el mundo de Platón, un mundo irreal por el momento, el universo cerrado del cerebro de los teóricos. Por ello debemos esperar la confirmación experimental, las pruebas iniciales.

Estas investigaciones y sus implicaciones impulsan a los investigadores de la física de partículas a suscitar nuevos y gigantescos créditos para construir aceleradores cada vez más grandes, con el propósito de explorar mucho mejor la materia. Pero ahora, eso ya les no funciona.

Mientras que en Estados Unidos sesuspende el "supercolisionador", o *supercollider*, los investigadores europeos del CERN* sufrieron para reunir los millones de euros necesarios para construir el LHC. El fin de la guerra fría "enfrió" a la física de altas temperaturas. Sin duda, los físicos entienden mejor ahora las motivaciones profundas de sus generosos financiadores de ayer. Acostumbrados a gastar sin medida, tendrán sin duda que inventar métodos diferentes y menos costosos para estudiar la estructura íntima de la materia.

¿Y si para obtener las muy altas energías que se necesitan se tuviera que regresar a la cima de las montañas o recurrir a los satélites para usar los rayos cósmicos? ¿Y si la experimentación de laboratorio estuviera ahora prohibida por su imposibilidad o alto costo y hubiera que contentarse con observar el cosmos y encontrar en él las pruebas de tal o cual teoría? ¡Sería la gran revancha de la observación sobre la experimentación! Y en caso de que los físicos se vieran obligados a modificar sus lujosas costumbres, ¿quedaría asegurado con ello que la física saldrá ganando?

La física cuántica ha permitido una exploración sin precedentes de la materia y la luz. Para este fin se construyó un verdadero monumento de lógica racional. ¿Ya pasó esa época? ¿Habrá que pensar que al detenerse la megafísica sobreviene el fin de la física cuántica? ¿El abandono de los supercolisionadores es el canto de cisne de la física? Permítaseme a este propósito evocar una parábola contada por Freeman Dyson.[25] Cuando en 1938 Bragg sucede a Rutherford en la dirección del laboratorio Cavendish de Cambridge, todos los científicos brillantes que ahí trabajaban lo abandonaron. Cambridge, con Rutherford al frente, había sido el centro mundial de la física nuclear. Un año después de su muerte, Berkeley le había robado el papel estelar. A pesar de las protestas escandalizadas de muchos de los físicos, Bragg decide cambiar de camiseta y no sin soberbia declara: "Le enseñamos al mundo cómo explorar el núcleo, intentemos enseñarle otra cosa". Diez años más tarde, el laboratorio Cavendish se había convertido en el centro mundial de la radioastronomía, la radiocristalografía y la biología molecular, todas ellas disciplinas que nacieron en Cambridge. Los premios Nobel se fueron acumulando. Bragg había ganado su apuesta "sin tratar de que renaciera el pasado, dándole la espalda a las modas, indiferente a las críticas de los teóricos", como escribiría más tarde Freeman Dyson, teórico también.

* Siglas de *Centre Européen pour la Recherche Nucléaire,* Laboratorio Europeo de Física de Partículas. El CERN se encuentra en la frontera entre Francia y Suiza, en la afueras de Ginebra. [T.]

[25] *D'Éros à Gaïa,* París, Le Seuil, 1995

Cerraremos este capítulo con el episodio de las "grandes máquinas" de la física de partículas, en vista de que son ellas las que determinan la manera en que muchos ciudadanos perciben a la física y, en consecuencia, a la ciencia. No cabe duda de que la física nuclear logró beneficiarse con enormes recursos gracias a la esperanza que alimentaban los gobiernos de que las investigaciones permitirían descubrir nuevas armas. Es indudable que existe un vínculo directo entre el proyecto Manhattan y los grandes aceleradores de Stanford, Batavia, Hamburgo o Ginebra. No obstante, este tipo de investigaciones dio origen a la energía nuclear, más limpia de lo que a veces se dice, y que brinda muchos servicios a la humanidad. Es cierto que se fabricaron bombas terroríficas basadas en la fusión de átomos. Tales bombas son capaces de pulverizar Nueva York, París o Roma en cuestión de minutos, de sembrar la muerte en territorios tan grandes como el de Francia o de hundir a la Tierra en un invierno nuclear de varias decenas de años. Sin embargo, las investigaciones sobre la fusión controlada tal vez permitan algún día disponer de una fuente inagotable de energía no contaminante. ¿Entonces?

La historia de la ciencia y la tecnología se repite. La parábola del cuchillo se mantiene más que nunca vigente. Los científicos no tienen el poder de decisión sobre la suerte de sus descubrimientos. ¿Pero cómo pueden decidir los ciudadanos si se les mantiene distanciados del conocimiento, si desconocen la diferencia entre reactor nuclear y bomba, entre fisión y fusión?

Pese a todas estas incertidumbres, no debemos olvidar el éxito extraordinario del modelo cuántico, tanto desde el punto de vista teórico como por sus aplicaciones.

Desde el punto de vista teórico, los físicos unificaron las concepciones sobre las ondas y las partículas, que se oponían en todos los campos, lo mismo en la electricidad que en la óptica. Esclarecieron por completo las relaciones entre luz y materia. Mostraron que las fuerzas del univèrso eran de dos tipos, electromagnética y gravitacional.

En cuanto a las aplicaciones, el láser, el transistor (y por lo tanto, la computadora) y el reactor nuclear surgieron todos directamente de la revolución cuántica.

Sin embargo, todos estos desarrollos provenientes de una misma teoría no vieron la luz del día de una manera lógica y deductiva. Todos fueron el resultado de un ir y venir entre los experimentos y las modificaciones y adaptaciones del modelo general. Tras la unicidad cuántica aparecía por todas partes la diversidad de lo real.

VII. LA EXPLOSIÓN QUÍMICA

La química es sin duda alguna la disciplina científica que menos conoce la población en general. Relegada en los programas escolares, a menudo mal impartida, difícil de divulgar, la química significa para muchos manipulaciones misteriosas, aromas y colores que la acercan al arte culinario, con el que gustosamente la comparan. Nada más injusto.

Se trata en realidad de una de las ciencias más fascinantes que existen, en donde campean la imaginación y la iniciativa, para desembocar en la invención de algún nuevo producto que transformará nuestras vidas. Resulta asimismo imprescindible para entender el funcionamiento de la Tierra y de la vida. Sin embargo, la actual atracción de (y por) la química no es muy antigua; su auge se remonta a la posguerra, tanto en lo que concierne a sus fundamentos teóricos como a sus diversas aplicaciones.

Ya rememoramos la situación de la química del siglo XIX y de principios del XX, así como los problemas que tuvo para sustentar los conceptos (fundamentales para esta ciencia) de átomo y molécula. Mencionamos también hasta qué grado se vio beneficiada por la revolución cuántica. Continuaremos a partir de este punto nuestra historia.

Química cuántica

Después de haber proporcionado una descripción convincente del átomo, la mecánica cuántica va a interesarse por los conjuntos de átomos múltiples y asociados. Estos conjuntos se llaman moléculas, macromoléculas o cristales. Al químico no sólo le interesa explicar las propiedades de esas complejas construcciones, sino sobre todo dilucidar cómo y por qué se constituyen. Desea conocer el tipo de vínculo que une a un átomo con otro átomo, la solidez de esta relación y la forma en que se establece.

El estudio del enlace químico es de carácter fundamental para el químico.

A principios de siglo, el químico estadunidense Lewis formuló la teoría del enlace químico por medio de electrones comunes; sin embargo, esa teoría ignoraba el universo cuántico, al igual que el modelo

del átomo de Bohr. Aunque se sabía desde aquel entonces que sólo la mecánica cuántica permitía una descripción "científica" del átomo, faltaba encontrar la manera de explicar el enlace químico valiéndose de ella.

En 1927, el trabajo de Heitler y London sobre la molécula de hidrógeno brindó la primera explicación cuántica de la molécula; destaca enseguida la obra de uno de los gigantes del siglo XX, Linus Pauling.[1] Junto con otros, pero a menudo antes que ellos, este científico fundó la teoría moderna del enlace químico al establecer una estrecha relación entre las observaciones en que se basaban los supuestos iniciales de sus modelos teóricos y los experimentos de laboratorio.

Su primera idea, sorprendente, perturbadora incluso para algunos espíritus unificadores, establece que el enlace es múltiple. Distingue en principio dos tipos: el enlace químico fuerte y el enlace químico débil.[2] El primero se establece, por ejemplo, en una molécula en el seno de un cristal, y garantiza la solidez del edificio. El segundo garantiza la cohesión de un líquido o bien de las hojas de mica, o la de las moléculas de gas cuando se pegan a una pared.

A partir de esta distinción principal, Pauling subdivide el enlace fuerte en dos tipos: el enlace covalente, llamado así porque los átomos comparten dos electrones (cada uno) para crear el enlace; y el enlace iónico, que se establece entre dos átomos previamente transformados en iones, es decir, que han perdido o ganado un electrón. Después, entran en juego las leyes de la electroestática. Todo se explica respetando cada una de las reglas cuánticas.

Lo que es admirable en esta teoría es que se expresa en términos sencillos del lenguaje químico. Lejos de ser un monumento esotérico sumamente matematizado, lo que provocaría la admiración de las "multitudes amantes de lo absoluto", la teoría del enlace químico se convertirá en herramienta rigurosa, fuerte, vinculada con los hechos, lista para que el químico la use en el laboratorio.

De este modo la química teórica podrá preservar los rasgos característicos de esta ciencia.

[1] Linus Pauling es de los pocos científicos que han recibido dos premios Nobel, el de Química, desde luego, y el premio Nobel de la Paz por sus acciones en contra de las explosiones nucleares en la atmósfera. Fuera del campo de la química, destaquemos que participó en el descubrimiento de la estructura de la doble hélice del ADN.

[2] Los enlaces débiles se llaman también enlaces de Van der Waals, nombre del físico holandés que los descubrió. Son atracciones eléctricas "débiles", como en el caso del enlace de hidrógeno o del llamado enlace dipolo-dipolo.

Química y física

Tras la aplicación de la mecánica cuántica a los átomos, la explicación de la tabla de Mendeleiev y el descubrimiento del secreto del enlace químico, se podría haber pensado, en efecto, que la química se convertiría en un simple apéndice de la física: varias reglas para determinar la manera en que los electrones periféricos se reparten en torno a los núcleos de átomos, cómo se vinculan entre sí los átomos para formar moléculas (o cristales); todo ello controlado por las reglas cuánticas para explicar las relaciones entre luz y transición electrónica en los átomos o en las moléculas, ¡y el juego habría terminado![3]

Como suele suceder en la ciencia, se creía que todo estaba dicho. Pero más bien, era apenas el principio. La química constituye en este aspecto lo contrario de la física. El físico busca unificar las leyes, explicar fenómenos múltiples por un principio único. La búsqueda de la unificación de las fuerzas, de la analogía de los fenómenos, ha sido uno de los motores más poderosos en el progreso de las ciencias físicas: Ampère unifica electricidad y magnetismo; Maxwell añade la luz; los físicos modernos intentan la gran unificación de las cuatro fuerzas fundamentales que Einstein había investigado toda su vida. A la inversa, el químico practica su disciplina en la diversidad, en la variedad. Inventa, combina, disocia, asocia átomos y moléculas al infinito para crear un mundo en constante renovación. El químico es un artista, una especie de pintor. Éste dispone de seis colores y dos dimensiones; el químico tiene en su "paleta" los 92 elementos químicos que Mendeleiv clasificó en su tabla, y el espacio tridimensional para ensamblarlos, construir arquitecturas complicadas, y con colores y aromas amargos o dulces.[4]

La materia se encuentra, en efecto, compuesta de 92 tipos de átomos producidos en las estrellas del cosmos y que se vinculan entre sí gracias a sus electrones externos, los cuales forman un número igual de "brazos". Cada tipo de átomo tiene uno, dos, tres, cuatro o incluso cinco brazos: a ese número de enlaces simultáneos se le llama valencia del átomo. No obstante, la manera en que estos electrones externos forman asociaciones también es múltiple y variada. Algunos enlaces

[3] Un célebre físico teórico escribió recientemente en un libro de divulgación que la química era una simple aplicación de la electrodinámica cuántica. Eso equivale equivale a afirmar que a partir de que se conocen las ecuaciones de las olas, se comprende la geografía de las costas, afirmación que demuestra sencillamente que no se ha comprendido nada de la química, de sus objetivos, ni de su objeto.

[4] Existen incluso compuestos químicos, los aminos, que son a la vez amargos y dulces: el "sabor del pecado".

son muy fuertes, por ejemplo, cuando dos átomos comparten a los electrones. Otros, muy sólidos en el aire, pueden romperse en el momento en que se remoja al cuerpo en agua, como en el caso de la sal de cocina (NaCl). Otros, por último, son más sutiles, menos fuertes, más maleables; se les llama enlaces débiles, por ejemplo el enlace de hidrógeno, que da a los cristales de hielo su forma hexagonal. Los enlaces desempeñan un papel fundamental en el comportamiento de las grandes moléculas. Como vemos, por todas partes se observa la variedad en los átomos, en los tipos de enlaces, en la manera en que se vinculan.

Moléculas

Con ayuda de sus "brazos" electrónicos, los átomos se enlazan entre sí y forman asociaciones: las moléculas. Las moléculas simples se forman con la asociación de dos tipos de átomos, como el agua H_2O (hidrógeno-oxígeno), el óxido de carbono (gas tóxico), CO (oxígeno-carbono), el metano (CH_4) o gas natural (carbono-hidrógeno). En ocasiones, los átomos pueden enlazarse fuertemente entre sí por dos brazos, en un enlace doble, como en el caso del etileno (C_2H4), en el que los dos carbonos se enlazan dos veces, e incluso mediante tres brazos, como en el caso del acetileno, el combustible de los antiguos faroles (C_2H_2). Estos enlaces múltiples vuelven más fuerte y más rígido el enlace. Las moléculas complejas cuentan con tres, cuatro, cinco tipos de átomos diferentes: además del carbono y el hidrógeno, usan el oxígeno, el azufre, el nitrógeno y el fósforo, como en el caso de las moléculas vivas. En la actualidad, los químicos saben incorporar a las moléculas orgánicas todos (o casi a todos) los átomos de la tabla de Mendeleiev, del níquel al rutenio.

Las figuras geométricas que las moléculas pueden construir en el espacio dependen naturalmente de las orientaciones y las valencias de los átomos. Así, el carbono, que puede enlazarse con otros cuatro átomos, dibuja un tetraedro en el espacio. También puede enlazarse a tres átomos y formar un plano o enlazarse a dos átomos y trazar una recta. Estas asociaciones de carbono pueden dar paso a cadenas como la del octano de la gasolina ordinaria (C_8H_{18}), e incluso a cadenas largas como los polímeros. Pueden producir ciclos, como el del benceno (C_6H_6), o bien asociaciones complejas de ciclos como el de la clorofila. Si en la punta del tetraedro se implantan cuatro moléculas en forma de tallos largos, se obtendrá una especie de estrella de cuatro picos; si se implanta un átomo de carbono en cada uno de los cuatro picos, en la estrella primaria surgirán arborescencias, y así sucesivamente.

Si se trata de átomos de tres valencias —tres brazos— como el nitrógeno, se podrá construir una estrella plana de tres picos. A partir de eso se producirán estructuras planas. Las arquitecturas químicas son por lo tanto infinitas. La variedad ofrece sus diversas formas: variedad geométrica de las estructuras moleculares debido a los diferentes átomos y debido, también, al tamaño de los átomos. En efecto, los átomos grandes como el azufre alejan a aquellos que los rodean; los pequeños como el hidrógeno pueden alojarse en las cavidades diseñadas por los más grandes, etcétera.

¿Cuántos átomos pueden unirse en una molécula? Durante mucho tiempo se creyó que en los laboratorios el hombre sólo podría producir moléculas sencillas con un máximo de varias decenas de átomos, y que la fabricación de grandes moléculas —las de 100 000 o 10 000 átomos, como las proteínas[5] o los ácidos nucleicos— estaba reservada al mundo de los seres vivos. Uno de los grandes progresos de la química moderna consistió en arrojar luz sobre el secreto de la producción de grandes moléculas compuestas por miles de átomos. Fue difícil descifrar ese secreto, pues la química es mucho más que la construcción de modelos lúdicos en donde las esferas representan átomos y los cerillos simulan valencias. En realidad, los enlaces entre los átomos, su solidez y sus ángulos obedecen a leyes muy sutiles que la mecánica cuántica explica; los químicos han sabido traducirlos a una serie de reglas rigurosas, simples y prácticas, llamadas reglas de combinación, que soslayan el pesado aparato matemático.

Química del carbono y química orgánica

Uno de los grandes capítulos de la química se desarrolló a partir de un elemento específico, el carbono, que es el constituyente esencial de la materia viva, es decir, de los organismos vivos; de ahí se deriva el nombre de química "orgánica" con que se denomina a la química del carbono.

Ahora bien, sabemos que la química de los seres vivos se caracteriza por la existencia de grandes conjuntos moleculares, de grandes moléculas que incluyen varios millones de átomos, entre las cuales destaca el famoso ADN, sustento universal de la herencia.

La propiedad básica del átomo de carbono en virtud de la cual es el único que se encuentra en el origen de miles de compuestos químicos y desempeña un papel tan importante en la química, radica en su

[5] Véase el capítulo IV.

[T.] célebre personaje de la obra de Molière *El burgués gentilhombre.*

capacidad de unirse a otros cuatro átomos mediante enlaces sumamente sólidos dirigidos hacia la cima de un tetraedro, o bien a tres átomos en forma de triángulo, o a dos según una recta. Al unirse unos a otros, los átomos de carbono pueden constituir largas cadenas, más o menos flexibles, o complejas arquitecturas tridimensionales. Los compuestos de carbono son a veces flexibles, de modo que el ácido esteárico $C_{18}H_{36}O_2$ puede tomar la forma de una larga cadena, o bien enroscarse en forma de esfera, pero siempre con una estructura extremadamente sólida. Al introducir en el compuesto átomos de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno o fósforo, hemos visto que podrían construirse moléculas con geometría o propiedades sumamente diversas, ya que a cada tipo de estructura y de constitución le corresponde una gran variedad de propiedades de color, olor, resistencia mecánica, poder solvente, estado líquido o sólido, espuma o laca. Si un tipo de átomo llega a ser remplazado por otro, cambia de color; si un rizo remplaza a una cadena larga, el producto se vuelve resistente. Si un átomo de oxígeno se ve remplazado por uno de azufre, el olor se vuelve nauseabundo, como en el caso de los tioles. Si el hierro remplaza al magnesio en determinada molécula compleja, la clorofila verde, capaz de asimilar el gas carbónico, se transforma en hemoglobina roja, base de la respiración sanguínea. Sean líquidos, sólidos, gaseosos (como el vapor) o pastosos (como la mantequilla), los materiales cuyo componente elemental es la molécula contienen miles de millones de millones de dicho componente por centímetro cúbico.[6] Este componente puede estar constituido por moléculas simples como el agua H_2O o el óxido de nitrógeno NO, por macromoléculas como el ARN, por polímeros como el polipropileno (CH) (CH_3) (CH_2), y a cada estructura le corresponden funciones únicas. Variedad y diversidad son, pues, las palabras clave de la química orgánica, aun cuando se trate siempre de una arquitectura del carbono que obedece a las mismas reglas simples.

SÍNTESIS QUÍMICA

Sin embargo, la química, ya lo hemos dicho, no consiste únicamente en concebir moléculas sobre el papel con la ayuda de un lápiz o de una computadora; se trata sobre todo de saber preparar específicamente y de hacer surgir compuestos complejos, de convertirlos en realidad. En la síntesis química se encuentran tanto el arte como la difi-

[6] En 12 gramos de carbono hay $6\ 023 \times 10^{23}$ átomos de carbono. En un gramo de hidrógeno, hay $6\ 023 \times 10^{23}$ átomos de hidrógeno. Este número se llama número de Avogadro e indica el número de átomos que contiene un átomo-gramo de un elemento.

cultad de esta ciencia. Hacer reaccionar dos cuerpos, dos productos, dos tipos de moléculas para obtener un tercero; implantar un átomo particular en una cadena de carbono; sustituir el extremo de una cadena con alguna otra forma química, eso es lo que constituye la especialidad del químico al manipular sus frascos en el laboratorio o al supervisar sus grandes tinas en la industria.

En todo caso, la tarea no es sencilla. Una reacción química es una operación compleja que pone en juego miles de moléculas. No siempre se llega al resultado previsto. Algunas moléculas reaccionan y otras no. El resultado es, en consecuencia, estadístico, y la tasa de éxitos en una reacción se llama rendimiento, que en muchos casos es de sólo entre 20 y 30%. Dicho de otra manera, no se producen entre 80 y 70% de las reacciones moleculares a las que se desea llegar.

Si se desea elaborar una molécula compleja, se debe trabajar etapa por etapa: producir una cadena aquí, un bucle allá, una estrella por otro lado y después reunirlas. ¡Resulta más sencillo decirlo o escribirlo que hacerlo, pues los átomos tienen simpatías y antipatías! En presencia uno de otro, algunos rompen todos sus enlaces, todas sus ataduras para acoplarse y formar una molécula sólida, pero que no es la molécula que se desea. Otros, por el contrario, se rechazan y al ubicarlos en una sola molécula, la rompen. Hay infinidad de reglas complejas que conocemos separadamente, pero cuya combinación suscita a menudo sorpresas. Se requiere, por tanto, idear estratagemas, esconder un átomo aquí, enlazar otro allá. En resumen, la construcción de una molécula requiere una verdadera estrategia.

Las reglas específicas que los químicos descubrieron paso a paso en la segunda mitad del siglo XX y que explicaron con ayuda de conceptos cuánticos,[7] les permitieron, a partir de entonces, fabricar moléculas cada vez más complejas siguiendo una lógica muy precisa. Para lograrlo, además de los átomos ligeros comunes, carbono, nitrógeno, hidrógeno, fósforo, oxígeno, saben cómo usar los metales pesados como hierro, plata, cobre, etc. Poco a poco se fue extendiendo la química de la síntesis a la confección de inmensas moléculas como, por ejemplo, las enzimas. Para caracterizar los progresos extraordinarios realizados en la síntesis química, los especialistas conservan dos fechas: 1828, con la síntesis de la urea por Wöhler, una molécula de ocho átomos (CH_4ON_2); y 1968 y 1970, con la síntesis de la vitamina B12, por Robert Woodward y Albert Eschenmoser, apoyados por un centenar de colaboradores cada uno. La urea contiene 10 átomos, ¡la vitamina B12, 200!

[7] Véase el capítulo II.

La síntesis química es sin duda el resultado más extraordinario y creativo en la práctica de los químicos; sin embargo, no existiría sin su complemento, el análisis.

Análisis químico

El análisis químico es la operación que consiste en identificar la naturaleza y la estructura de un cuerpo o de una sustancia desconocidos. Gracias al análisis, se logró identificar las moléculas que constituyen los tejidos de los seres vivos. Se determinó primero su composición y posteriormente su estructura tridimensional. Se les clasificó, a continuación, en lípidos, glúcidos y prótidos. El análisis químico resulta indispensable, por lo tanto, para el desarrollo adecuado de la síntesis química, ya que permite controlar en cada etapa la naturaleza de los productos obtenidos. Sin análisis, ¿cómo se sabría que se ha logrado la síntesis prevista? ¿Cómo se calcularía el rendimiento?

Ahora bien, desde hace treinta años, los avances en los métodos de análisis han sido extraordinarios en virtud del perfeccionamiento de los métodos físicos, basados en su mayoría en las famosas propiedades cuánticas de interacción entre la luz (o sus equivalentes, radio, rayos ultravioleta, infrarrojos y rayos x) y los electrones o los núcleos de las moléculas.[8] Al estudiarse con el equipo adecuado, las moléculas revelan sus estructuras y permiten así establecer para cada una de ellas una huella. A partir del catálogo de tales huellas, se reconocerá el grupo de ácidos, el ciclo benceno, el doble enlace, etc. Las espectroscopías múltiples —llamadas así porque producen todos los espectros, es decir, asociaciones de bandas y de rayos luminosos— son los auxiliares indispensables en la práctica moderna de la química. Recordemos que gracias a los rayos x, Maurice Wilkins y Rosalyn Franklin determinaron la estructura en doble hélice del ADN. Con la ayuda de la misma técnica se identifica asimismo la estructura de una molécula natural o de un producto sintético. Gracias a las diversas formas de la espectroscopía —rayos infrarrojos, de resonancia magnética nuclear o rayos x— el químico sigue paso a paso las síntesis que desarrolla. El método permitió el extraordinario desarrollo de la síntesis química moderna.

De la petroquímica a la bioquímica

El petróleo es el punto de partida de la química moderna y sobre todo de la industria química. Desde el momento en que la química cambia

[8] Véase, en el capítulo anterior, el apartado sobre espectrometría.

el laboratorio por la fábrica, ya no le bastan los frascos de reactivos para llevar a cabo sus propósitos y requiere de materias primas en gran cantidad. Ahora bien, el petróleo está formado por una mezcla natural de cadenas de carbono, en la cual el carbono y el hidrógeno se encuentran asociados (de ahí el nombre de hidrocarburos). Se les purifica, se les destila, se les rompe, se les clasifica y una parte de los productos se convierte en la materia prima destinada a la síntesis química. El juego de Mecano químico puede desarrollarse a partir de fragmentos de carbono provenientes del petróleo, así que éste no es sólo un combustible útil aunque contaminante, sino también materia prima con la cual se fabrican telas, cosméticos, medicamentos, etc., ya que la síntesis química de las grandes moléculas se extiende a todos los ámbitos, desde los perfumes hasta los alimentos para animales y sobre todo a los plásticos, cuyas propiedades sorprendentes permiten sustituir cada vez más a los metales en las construcciones, las tuberías, los vehículos. El químico esculpe las moléculas según las necesidades, y los industriales transforman estas creaciones en productos cotidianos.

La actividad creativa se vio seguramente potenciada a partir del momento en que se descubrió que los mecanismos fundamentales de la vida eran moleculares. La química de los seres vivos dio impulso a la química de laboratorio; se produce un medicamento aquí, una hormona allá, una enzima en otra parte. Para simplificar las síntesis, se recurre también a los seres vivos, bacterias en su mayoría, pero también a sustratos vivos, como en el caso de la reproducción artificial del ADN. Se abre así un mundo bioquímico nuevo, e inmenso en cuanto a sus potencialidades médicas, pero también industriales.

Química de sólidos

Hemos hablado de la química del carbono y de sus enormes avances. Otro sector que ha experimentado una revolución sin paralelo es el de la química del estado sólido.

Los átomos pueden constituir moléculas al asociarse; pueden asimismo formar cristales, que son asociaciones de millones de millones de átomos y constituyen redes periódicas tridimensionales, un "papel tapiz" atómico tridimensional. Los cristales son comunes en las rocas naturales. Su estructura se determinó hacia los años 1930-1940 gracias a los rayos X y a la dedicación de los Bragg, padre e hijo.

Los cristales se forman de diversas maneras en la naturaleza; algunos se cristalizan en un baño de fundición, como la lava volcánica.

Otros se precipitan en una solución líquida acuosa, como la sal de cocina cristalizada al evaporarse el agua de mar. En circunstancias muy particulares, como las constituidas por las nubes estelares, los cristales se forman directamente de un gas por condensación, proceso que desempeñó un papel importante en los comienzos del sistema solar.

Todavía hace veinte años, producir cristales en laboratorio no se consideraba una operación sencilla. Es verdad que los trabajadores metalúrgicos producían cristales metálicos desde la Antigüedad, pero siempre a partir de baños de fundición y únicamente para cierto número de aleaciones muy definidas. Es verdad que se producían sólidos refractarios al cocer la arcilla y se obtenían de ese modo tejas y ladrillos, pero el método era bastante primitivo y los materiales producidos, aunque útiles, resultaban bastante toscos. ¡Si se le hubiera dicho a un alfarero que lo que hacía era practicar la química de sólidos, se habría sorprendido tanto como cuando el Sr. Jourdain* supo que hacía prosa!

Sin embargo, al cabo del tiempo, el hombre aprendió a producir asociaciones de sólidos, cristales cada vez más complejos: al principio las aleaciones hierro-carbono; después el acero (hierro-níquel) que existía ya en los meteoritos; y por último los aceros especiales (hierro-cromo con carbono). Siguieron las aleaciones del titanio o del cobalto con átomos raros; la aleación cobalto-samario y sus propiedades magnéticas excepcionales; las aleaciones titanio-circonio en espuma que absorben los gases con una eficacia especial, etcétera.

Se aprende también a sintetizar óxidos cada vez más complejos. A partir de óxidos refractarios, y por ello resistentes al calor, se fabrican compuestos mixtos con propiedades muy diversas.

Antes se pensaba que sólo se podían producir sólidos que contaran con uno o dos tipos de átomos diferentes. En la actualidad se cree posible producir capas compuestas de varios átomos diferentes, apilarlas una sobre otra en secuencias variables y cambiar su naturaleza; en resumen, hacer "sándwiches" químicos, lo cual se aplica a las aleaciones metálicas y a los óxidos refractarios. Los enlaces químicos que operan en tales sólidos son diferentes de aquellos que unen las cadenas de carbono de la química orgánica. En los metales se trata de un enlace especial, llamado metálico, en el que todos los átomos comparten sus electrones externos. En los óxidos, se trata, por el contrario, de la captura de electrones por algunos átomos que cuando se saturan de ellos, atraen a quienes los han perdido. Se trata del enlace iónico, que posee propiedades eléctricas interesantes.

Todas estas construcciones de cristales se controlan recurriendo, naturalmente, a los métodos de la química estructural y en primer lugar a los rayos x. Cabe reiterar que sin los medios del análisis a profundidades, ninguna síntesis sería posible.

A partir de estas técnicas, ciertos materiales con propiedades extraordinarias han hecho posibles todas las revoluciones tecnológicas modernas, desde la espacial hasta la aeronáutica, pasando por los utensilios de cocina y el automóvil. Sin embargo, dos descubrimientos en particular van a maravillar al mundo: los cuasicristales y los nuevos superconductores.

Cuasicristales

Los cristales se caracterizan por la periodicidad de sus enlaces atómicos, propiedad que les confiere una simetría tanto en su apariencia macroscópica como en los negativos de los rayos x. Estas simetrías cristalinas estudiadas desde hace dos siglos pueden ser de orden 2, 3, 4 o 6, pero no de orden 5, el cual se excluye, como cuando se quiere poner piso en la cocina: si se usaran losetas pentagonales, quedarían huecos y no se cubriría todo el espacio. Ahora bien, en 1983, al estudiar las aleaciones de aluminio-manganesio, un grupo de investigadores israelíes, franceses y estadunidenses lograron una simetría de orden 5. El estudio se repitió con la misma aleación y después con otras, hasta que finalmente se rindieron ante la evidencia: ¡existen sólidos cristalizados con simetría prohibida!

Estos sólidos parecen cristales, pero no lo son; tienen una periodicidad semejante, pero no una periodicidad real, un poco como las decoraciones africanas que a primera vista parecen simétricas pero cuyos motivos están en realidad ligeramente desplazados, o bien son un poco diferentes.

Al abordar el problema de los baldosines pentagonales, el físico inglés Roger Penrose había logrado efectivamente llenar el espacio, pero con baldosines de tres tamaños diferentes y con el diseño de un motivo "casi simétrico". Los cuasicristales son análogos a los baldosines, pero de tres dimensiones. ¿Cómo se formaron? Lo ignoramos; pero sus propiedades son extrañas. Formados con la aleación de metales conductores, los cuasicristales correspondientes son aislantes; algunos son más duros que el acero pero más frágiles que el vidrio y su superficie impide la adherencia (son buenos revestimientos de las cacerolas). ¿Se habrá descubierto aquí una nueva clasificación de la materia sólida? Aún no lo sabemos.

SUPERCONDUCTORES

El segundo descubrimiento, el más sorprendente, es el de los superconductores a "altas" temperaturas.

Cuando se intenta hacer pasar electricidad por un alambre, digamos, de cobre, éste se calienta, lo cual prueba que los movimientos de cargas eléctricas encuentran resistencia a su paso y que la energía que así se disipa se transforma en calor. La resistencia eléctrica, tan útil en la calefacción, es una lata para quienes desean distribuir electricidad y más para quienes desean almacenarla; es una pesadilla tanto para la compañía de luz como para los fabricantes de supercomputadoras.

Ya vimos que al enfriar el mercurio a -269°C, su resistencia eléctrica desaparece, de modo que la corriente pasa sin pérdida de energía y sin disipación de calor: se transformó en superconductor. Los superconductores resultan entonces la solución a todos los problemas de distribución y almacenamiento de electricidad. ¡Sólo que para transformar los metales en superconductores, se tiene que enfriarlos a temperaturas tan bajas que el costo de energía es prohibitivo! ¿Cómo hacer más accesible la superconductividad? Tal es el sueño acariciado por los ingenieros y los físicos desde hace 65 años. Por desgracia, de acuerdo con la teoría BCS,[9] la superconductividad está circunscrita al entorno del cero absoluto (-273°C).

A pesar de la imposibilidad teórica, los investigadores nunca han dejado de probar suerte. Fue así como Müller y Bednorz, de los laboratorios IBM en Zurich, hicieron polvo las predicciones de los teóricos al producir un óxido de cobre superconductor a –245°C que contiene estroncio; ¡todavía muy frío, pero que ya se alejaba del cero absoluto! Y si ya se rompió el "muro de la teoría", ¿por qué no esperar más logros? A partir de 1986, un fervor sin precedente ha invadido a la comunidad internacional de investigadores. El número de quienes trabajan en la superconductividad pasa de unas cuantas decenas a varios miles. En un clima de competencia desenfrenada, con miras al premio Nobel y la fortuna industrial, se dedican a preparar más y más materiales de síntesis que se suponen superconductores, a temperaturas cada vez más "altas". La marca hoy día es de –135°C, temperatura por arriba de la del nitrógeno líquido, el refrigerante común en los laboratorios, pero de cualquier manera todavía muy fría. Lo curioso es que los materiales que presentan dichas propiedades no son los metales, sino los óxidos, a los cuales por lo común se tendía a considerar

[9] BSC, siglas que significan Bardeen-Cooper-Schrieffer,formadas a partir de los apellidos de los tres físicos que plantearon la teoría de la superconductividad.

como aislantes. Ninguna teoría química o física explica esta superconductividad llamada de "altas temperaturas". Sin embargo, los químicos de los sólidos continúan su búsqueda apasionada. ¿Hasta cuándo se contará con el superconductor a temperatura normal? ¿Tal vez mañana? ¿O tal vez nunca?

Química supermolecular

Como ya lo habíamos señalado, existen dos tipos de enlaces químicos: los enlaces fuertes, iónicos, covalentes o metálicos, y los enlaces débiles. Estos últimos son de 100 a 1 000 veces menos "fuertes" que los primeros, y son el resultado de una atracción eléctrica muy débil. Sin embargo, en gran diversidad de situaciones, los llamados enlaces débiles se vuelven determinantes.

Tomemos un ejemplo que ya habíamos abordado: la separación en el laboratorio de dos cadenas de ADN. Para llevarla a cabo, se eleva la temperatura del ADN a 60°C; a esta temperatura, los "puentes" que vinculan las dos hélices se abren y se vuelven independientes. ¿Qué fue lo que sucedió? Las dos hélices están unidas entre sí por enlaces débiles, mientras que cada hélice está constituida por enlaces fuertes. A 60°C, la agitación térmica resulta suficiente para romper los enlaces débiles, pero deja intactos los fuertes. Siguiendo este principio, es posible producir ensambles de moléculas e incluso ensambles entre moléculas y cristales.

Gracias a los enlaces débiles que permiten unir moléculas entre sí (constituidas también por enlaces fuertes), es posible crear ensambles moleculares que toman diversas formas: de jaulas, de hélices, de estrellas, etc. Pero lo que resulta extraordinario en las formas de esos objetos químicos es que evolucionan y son maleables. Se pueden deshacer enlaces aquí y recombinarse allá. Estos objetos pueden unirse no en función de la afinidad de los átomos individuales, como en un enlace fuerte, sino de acuerdo con las propiedades "colectivas" de una forma particular de molécula o motivo molecular. La forma de una molécula en el espacio puede resultar análoga a la de un empalme, o a la de una ranura en carpintería, o a la de piezas de un juego de Lego. Dos formas complementarias pueden encajar una en otra o vincularse sólidamente por el simple efecto geométrico.

De esta manera, es posible analizar o incluso simular el proceso de "reconocimiento" tan importante en biología molecular; comprender la forma en que una molécula anillo acepta un ión, rechaza otro y deja pasar un tercero, como sucede en las membranas de las células nerviosas. El fundador de esta química, Jean-Marie Lehn, nos conduce

en la actualidad hacia nuevos y extraordinarios horizontes: el de la autoorganización supermolecular, mediante la cual las moléculas crean formas al ensamblarse de manera espontánea; el de la calculadora química, en la que se podrían almacenar, como en el ADN, millones de datos, leerlos, combinarlos, etcétera.

¿Constituyen la química supermolecular y los enlaces débiles el futuro de la química? Todo parece indicar que sí.

FEMTOQUÍMICA

Química orgánica, química de sólidos, química supermolecular; los éxitos de esta ciencia son tantos que se podría pensar que en la actualidad es posible producir cualquier compuesto. El "sueño químico" parece ahora no tener límites, siempre y cuando se encuentre la vía, es decir, el secreto de la reacción química.

Cuando se ponen dos sustancias químicas una en presencia de otra, ¿cómo reaccionarán? ¿Se ignorarán, permaneciendo inertes e indiferentes? ¿O por el contrario, romperán sus enlaces, liberando sus átomos y permitiendo nuevos ensambles?

Desde el siglo XIX se busca responder a esta pregunta fundamental por medio de la termodinámica; pero esta ciencia aplicada a las reacciones químicas se limita a decir lo que es posible y lo que es imposible. A pesar de las aportaciones de este enfoque, que se contenta con generalidades (no olvidemos que en el siglo XIX los expertos en termodinámica química fueron quienes lucharon a brazo partido contra la hipótesis atómica), los químicos quieren saber más. Desean conocer a profundidad los mecanismos de las reacciones químicas.

La cinética química se esfuerza en describir esto. ¿Cómo actúan los átomos? ¿Cómo se rompen y rehacen los enlaces? ¿Cuánto tiempo duran estos fenómenos? La química del siglo XIX permitirá dar respuestas muy precisas a esas preguntas. Dejemos de lado las múltiples y brillantes etapas que marcaron el desarrollo de la disciplina y los trabajos de Arrhenius, Eyring, Polanyi, Porter y algunos otros y concentrémonos en el presente.

El principio de estas investigaciones recurre a las leyes de interacción de la luz con la materia. Se sabe que en el momento de iluminar un átomo con luz, sus electrones pasan a los niveles superiores y entran en excitación. Cuando se trata de moléculas ocurre lo mismo, a menos que la iluminación sea un poco fuerte; en este caso, la molécula empieza a vibrar, a girar sobre sí misma y si la iluminación se vuelve muy fuerte, la molécula se rompe y se disocia en sus átomos constitu-

yentes. Se sabe que esto es lo que ocurre cuando un láser lleva mucha energía luminosa. También se puede analizar esa luz al hacer pasar por ella un gas compuesto de átomos y moléculas e identificar la huella óptica de las moléculas y átomos del gas. Es el principio de la espectroscopía que se explicó en el capítulo anterior.

A partir de estos resultados, se tuvo la idea de realizar un experimento con dos láseres y un espectroscopio. Un láser, poderoso, rompe las moléculas. El otro, de longitudes de onda de banda amplia, identifica las moléculas y trozos de las moléculas gracias a sus huellas luminosas, a su espectro característico. Para comprender lo que ocurre en el experimento, se necesita estar muy atento, pues los átomos son muy rápidos en sus acciones y reacciones. Es toda una hazaña técnica que, no obstante, los químicos han logrado realizar. Observan la reacción química, identifican sus productos con iluminaciones de láser cuya duración es actualmente el femtosegundo (10^{-15} de segundo), es decir, una milésima de un billonésimo de segundo. Proeza de la tecnología óptica en combinación con la habilidad de los químicos, cuyo maestro se llama Ahmed Zewail. Por ejemplo, cuando se estudia una reacción como $H + CO_2 - OH + CO$, se comprueba que se produce primero un compuesto intermedio [H-O-C-O]; posteriormente, en un segundo momento, ese "compuesto activo" (es el término técnico) se rompe a la mitad para dar como resultado de la reacción los compuestos OH y CO. Además, se puede medir la vida de la etapa intermedia: unos cuantos femtosegundos. Se ve entonces que al combinar los métodos de la óptica cuántica y de la química se puede seguir el trayecto de las reacciones químicas, sus mecanismos internos y el periodo de vida de los productos intermedios, como en una película filmada en una imagen cada 10^{-15} segundos. Estamos a punto de comprender la quintaesencia de los mecanismos generadores de todos los compuestos químicos que pueblan el mundo que nos circunda.

Catálisis

Sin embargo, los estudios no permiten todavía comprender todas las reacciones químicas, en particular aquellas que, por ser muy lentas, sólo pueden producirse cuando actúa una sustancia especial, un catalizador, sobre los participantes en la reacción. Los catalizadores más famosos son las enzimas, cuyo papel capital en biología ya vimos; pero no son los únicos. La química supermolecular, con la identificación de formas y enlaces débiles, permitió lograr grandes avances en la comprensión del fenómeno de la catálisis.

Supongamos un sustrato, una molécula cuyas formas permiten que dos participantes en la reacción se fijen en ella con un enlace débil. Los dos reactivos se encontrarán así ensamblados uno al lado del otro, "colocados" en el catalizador, y formarán con él una supermolécula efímera, lista para pasar a la forma activa. A partir de ahí, los dos participantes en la reacción, puestos uno al lado del otro con la intermediación de la molécula receptora, podrán "reconocerse", reaccionar y formar un nuevo enlace, constituir un nuevo compuesto químico. Como el enlace del compuesto será fuerte en general, se desprenderá con facilidad del sustrato, dejándolo intacto. De esta manera, el catalizador permite la reacción, pero no participa en ella. Resulta un tipo de intermediario, de casamentero; su superficie es un lugar de encuentro para las futuras moléculas que van a "casarse", a unirse.

Una vez más, se ve que la química moderna se encuentra en vías de explicar problemas que el siglo XIX ni siquiera sospechaba. Esta visión general nos mostró que se trata de un ciencia viva, ingeniosa, imaginativa, en plena expansión. Quienes en ocasiones se inquietan al preguntarse si esta ciencia no ha llegado a sus límites pueden tranquilizarse: la era de la química apenas comienza.

Al evolucionar hacia el reino de la combinatoria, al producir lo nuevo con átomos antiguos o nuevos, el químico empieza a construir nuestro futuro.

VIII. COSMOS

LA SEGUNDA MITAD del siglo XX presenció el desarrollo de una disciplina maravillosa: la astrofísica. Ésta brindó las primeras respuestas a preguntas muy antiguas, como ¿de dónde viene la materia?, ¿cómo se formó?, ¿qué es una estrella?, ¿qué es una galaxia? o ¿qué edad tiene nuestro Universo?

Descubrimos que el mundo físico tenía una historia que podía reconstruirse por medio de métodos científicos con un grado razonable de verosimilitud; la ciencia se volvió histórica. Haciendo a un lado sus gruesas lentes y sus complicados cálculos sobre la mecánica celeste, la astronomía se renovó y recuperó el papel preponderante que le habían atribuido los caldeos, es decir, comprender dónde estamos y de dónde venimos.

Sin tener la intención de revivir paso a paso esa extraordinaria aventura, recordaremos algunas de sus etapas más significativas, sin olvidar jamás que el astrónomo es un científico de una especie muy particular, pues al vivir enfrentado al vértigo que produce la observación del Universo y trabajar en las fronteras entre el sueño y la realidad, nunca se siente aturdido por la audacia de sus propias teorías.

La astronomía se inició con la observación de los planetas. El astrónomo "clásico" debía ser un óptico sin igual, capaz de sacarle el mayor partido a las lentes y los telescopios para captar el menor fotón que viajara a través del Universo; pero también un calculista preciso, empedernido, sistemático, capaz de interpretar con facilidad las ecuaciones de la mecánica celeste (es decir, de la mecánica racional).

LA DILATACIÓN DEL ESPACIO

A principios del siglo XX, las herramientas de trabajo de la astronomía evolucionaron. El telescopio había suplantado desde hacía tiempo a la lente astronómica;[1] los instrumentos de detección mejoraron; la placa fotográfica y después los detectores electrónicos sustituyeron al ojo, captando una proporción cada vez mayor de los fotones que nos envía

[1] El telescopio, que utiliza espejos (y ya no lentes como el anteojo astronómico) fue inventado por Newton en 1665; fue el tema de su primera disertación en la Royal Society, y el inicio de su gloria.

el Universo. El espacio observable se "dilató". La estrella se convirtió entonces en el objeto astronómico modelo, quitándole la primacía al planeta. Poco a poco, los astrónomos se dieron cuenta de que las estrellas se agrupan en sociedades de miles de millones de "individuos": las galaxias. La existencia de estas galaxias, entre las que figura la nuestra, llamada Vía Láctea, se impone sólo a principios del siglo XX.[2] Cuando las galaxias compuestas por miriadas de estrellas están lejos, se ven en el telescopio como puntos luminosos únicos, hasta cierto punto parecidos a una ciudad que se observa a distancia. Se emprende entonces el estudio de las galaxias grandes y lejanas y, finalmente, del Universo.

Las estrellas

De este modo la astronomía, inicialmente planetaria, se volvió estelar, galáctica y luego universal. Al ampliar su campo, el astrónomo descubre la variedad en todos los niveles: estrellas innumerables con apariencias muy diversas y situadas a distancias variables, y galaxias también muy diversas, lo que representa un aumento en la distancia de penetración de una magnitud de 15 órdenes.[3] El astrónomo, que creía ser óptico y mecánico y vivía en la tranquilidad del orden kepleriano, descubre que es un naturalista que vive en medio de la variedad y que, tal como hizo Linneo con las plantas, debe clasificar sus objetos antes de estudiarlos y comprenderlos.

Pero antes es necesario definir parámetros y medirlos. Los astrónomos tratarán de calcular las distancias, de estimar la brillantez de las estrellas y galaxias, su color, la energía que emiten, etc. Ninguna de estas tareas resulta fácil, y todas exigen mucho tiempo y paciencia así como numerosas hipótesis.[4]

[2] Las galaxias próximas han sido vistas como manchas o universos-islas desde el siglo XIX; la naturaleza de las galaxias lejanas provocó un animado debate en el que Hubble y también Zwicky fueron protagonistas. Centrales.

[3] Hacía buen tiempo que los astrónomos observaban las estrellas: desde el siglo XVII, Cassini en París y Flamsteed en Londres habían elaborado catálogos, pero estos objetos eran para ellos puntos luminosos sin textura interna. Sólo los planetas podían analizarse en detalle.

[4] La medición de la distancia de los planetas se hace con un método de triangulación, donde la línea de la base se dibuja con ayuda de dos observatorios, cuya distancia recíproca e conocida. Este método puede aplicarse a las estrellas cercanas, utilizando como base la distancia que separa las posiciones de la Tierra en el solsticio de verano y en el de invierno, es decir, 300 millones de kilómetros. La eficacia de este método llega sólo a 100 años-luz (30 parsecs), pues el ángulo se vuelve demasiado pequeño. Con ayuda del satélite *Hipparcos*, que aumenta aún más la "base", se alcanzarán 1 000 años-luz... En adelante, los métodos son menos seguros. Primero se utilizaron métodos de convergencia óptica y luego, alejándose aún más, el método de las Cefeidas. Las Cefeidas son unas estrellas cuya emisión de luz es pulsada. Se ha visto que, en las Cefeidas próximas, existe una relación entre el periodo de pulsación y la explosión de la estrella. A partir de

Para clasificar las estrellas emplearán finalmente dos criterios: el color,[5] dado que éste mide la temperatura[6] de la superficie, y la intensidad luminosa, que mide la cantidad de energía emitida. La primera se determina con los espectrógrafos;[7] la segunda con los bolómetros.

Provistos de estos criterios, los astrónomos lograrán clasificar las estrellas. El diagrama luminosidad-color, conocido bajo el nombre de H-R,[8] pondrá en evidencia algunos hechos notables. Por ejemplo, en este diagrama la inmensa mayoría de los puntos que representan a las estrellas se sitúan en una franja diagonal que los astrónomos llaman "secuencia principal", en la que se localiza nuestro Sol. En otras palabras, es una estrella común y corriente, como otros miles de millones. Ni centro del Universo, ni siquiera de la galaxia, ni objeto excepcional del Cosmos: nuestra estrella-sol es de lo más ordinario que existe.

Astrofísica

¿Cómo explicar esta clasificación, cómo superarla? Lo primero que hará la astrofísica es estudiar las estrellas y su funcionamiento.[9] Y para ello tomará como ejemplo al Sol, que es la estrella más cercana a nosotros. ¿Cuál es la fuente de energía que la hace brillar? ¿Cómo funciona esta inmensa caldera cósmica?

Ninguna reacción química conocida puede explicar a la vez el flujo de energía que emite el Sol en la forma de luz y la duración de su vida, que es de al menos varios miles de millones de años, a juzgar por

allí, midiendo la luminosidad de Cefeidas lejanas y su periodo de pulsión, se determina su distancia. Hubble fue el primero en utilizar este resultado. Se llega a una distancia de hasta 10 millones de años-luz. En el caso de las galaxias lejanas sólo se utilizan las galaxias-espirales, que se supone tienen una luminosidad constante. Esto permite alcanzar 100 millones de años-luz. Después, las hipótesis son menos seguras. Se trata, por ejemplo, de la constancia de las luminosidades de las explosiones de supernovas o de las de núcleos de galaxias.

[5] Observando una placa que se calienta, se sabe que su color varía con la temperatura. Al principio es, negra, luego se vuelve rojo oscuro, roja, azul y luego blanca. Estos colores han sido calibrados en temperaturas, de modo que el color de una estrella permite calcular su temperatura.

[6] Véase el capítulo III.

[7] Los primeros espectroscopios datan del siglo XIX con Wollaston, Fraunhofer y algunos otros. Los espectroscopios modernos que sirven para descomponer la luz no son prismas sino redes micrométricas constituidas por una serie de microhendiduras paralelas cuyo poder de separación es mucho más grande que el de los prismas.

[8] Fueron Ejnar Hertzsprung (H) y Henry Norris Russell [R] quienes perfeccionaron este diagrama en 1913.

[9] El nacimiento de la astrofísica puede situarse en el siglo XIX, pues con la espectroscopía la astronomía empezó a hacer a un lado las preocupaciones exclusivamente mecánicas. A principios del siglo XX esta actitud empezó a extenderse, sobre todo con Eddington, Zwicky y Hubble. Sin embargo, no fue sino después de la segunda Guerra Mundial cuando los conceptos cuánticos y relativistas permitieron el desarrollo de esta disciplina.

los restos de algas verdes fósiles que se han conservado en los archivos geológicos más antiguos.[10] Hacia la década de 1920, Eddington, el cuáquero y gran astrónomo inglés que había confirmado la relatividad general de Einstein con su experimento en la isla de la Ascensión, le sugirió a su colega de Cambridge, Ernest Rutherford, que la energía del Sol podía ser de origen nuclear. "¡Imposible!", respondió el papa de la incipiente nueva física nuclear. Las temperaturas del Sol no son suficientes para desencadenar reacciones nucleares. La respuesta de Eddington fue magnífica: "¡Me cuesta trabajo creer que lo que usted realiza en su laboratorio no pueda hacerlo el Sol!" Habrá que esperar a Gamow y la aplicación del efecto túnel[11] en 1929 para comprobar que las reacciones nucleares constituyen efectivamente la fuente de energía del Sol y, en general, de las estrellas.[12]

La estrella se convierte así en un objeto extraordinario, hecho de gas a altísimas temperaturas, que crea energía en su centro mediante reacciones nucleares y disipa esta energía hacia la periferia emitiendo una intensa radiación luminosa. Se examina al Sol: ¿de qué manera la energía generada en su centro se transfiere hasta su superficie? ¿Cómo explicar esos ritmos extraños que se observan en su superficie, mezcla de periodos tranquilos interrumpidos por crisis agudas donde la superficie solar se hincha y el astro emite con rabia poderosos chorros de partículas a los que se denomina *flares*, que provocan en la Tierra los fenómenos de las tormentas magnéticas?

Si el Sol nos fascina es porque está muy cercano. Ahora se pretende ir más allá de él y escudriñar las demás estrellas de nuestra galaxia: la Vía Láctea, y, más adelante, cuando los instrumentos lo permitan, las de las galaxias más próximas, como la de Andrómeda. Al aumentar el número de estrellas observadas, aumenta la variedad y el diagrama H-R se enriquece.

Nucleosíntesis

Es necesario vincular las explicaciones con lo que se ha observado y por lo tanto explicar la variedad. ¿Todas las estrellas provienen del mismo tipo de reactores nucleares? Lo más seguro es que no. A cada variedad

[10] Las algas verdes fabrican su materia viva por fotosíntesis, es decir, utilizando los rayos luminosos para transformar el gas carbónico en carbono orgánico. Su presencia garantiza al mismo tiempo la de la actividad solar.

[11] El efecto túnel es un fenómeno cuántico que permite que cierta proporción de partículas atraviesen una barrera de energía, pese a no tener *a priori* los cuantos de energía adaptados, como si en algunas partículas existiera un túnel que les permitiera franquear la barrera (montaña) de energía. Puede considerarse una consecuencia del principio de incertidumbre de Heisenberg.

[12] La reacción nuclear de síntesis del helio que alimenta de energía al Sol proporciona 20 millones de veces más energía por gramo de materia que la combustión del carbón.

de estrellas le debe corresponder cierta variedad de reacciones nucleares. Profundizando en esta cuestión los astrofísicos lograrán a la vez explicar la clasificación de las estrellas y resolver un problema fundamental de la ciencia: el nacimiento de los átomos, el origen de la materia.

Cuando hablamos de la estructura de la materia, dijimos que estaba constituida por átomos y que cada elemento químico tenía su átomo tipo.[13] Sin embargo, consideramos esto como un dato de la naturaleza, una constante que existió desde el principio de los tiempos, sin preguntarnos cómo y cuándo se formaron esos átomos. Tratando de comprender el origen de la variedad del cielo, los astrofísicos responderán a algunas preguntas que los químicos se planteaban desde hacía mucho tiempo: ¿de dónde provienen los átomos de los diversos elementos?, ¿cómo se formaron?

La respuesta es asombrosa: ¡los átomos de los 90 elementos químicos se formaron en las estrellas! Éstas son especies de "cocinas nucleares" que generan elementos químicos. Pero ¿cómo lo hacen?

Como ya vimos, cada átomo está formado por un núcleo pequeño, achaparrado, masivo, y por un cortejo de electrones periféricos ligeros y evanescentes. Para que se forme un átomo lo importante es el núcleo, lo cual no es extraño, pues éste contiene prácticamente toda la masa del átomo. La síntesis de los diferentes átomos se llevará a cabo durante ciertas reacciones particulares relativas al núcleo, es decir, reacciones nucleares.

¿Y qué relación hay entre reacciones nucleares y reacciones químicas? Las reacciones químicas consisten en transformar moléculas en otras moléculas provocando colisiones entre las primeras: $2H_2 + O_2$ Æ $2H_2O$. En las reacciones nucleares, los átomos se transforman en otros átomos, esta vez por colisiones entre los núcleos: He (Helio) + C(Carbono) Æ O (oxígeno). La diferencia profunda entre estos dos tipos de reacciones se debe a que la energía que interviene en las reacciones nucleares, que es al menos un millón de veces superior a la de las reacciones químicas.[14] Como muchas de éstas, las reacciones nucleares requieren cierta energía para ponerse en marcha, pero a su vez liberan una cantidad de energía mucho más importante. Por ello, una vez desencadenadas, pueden mantenerse por sí solas.

Para comprender el mecanismo de estas reacciones en los astros, el astrofísico debe recurrir a la física nuclear, la cual, por razones tanto civiles como militares, hizo grandes progresos entre 1939 y 1950. Los

[13] Véase el capítulo II.

[14] Esta enorme diferencia entre las energías que intervienen explica los fracasos de la alquimia. Se buscaba provocar reacciones nucleares (únicas capaces de transformar un elemento químico en otro elemento) con energías propias de reacciones químicas.

físicos nucleares nos enseñan que las reacciones de fusión más "fáciles de realizar" son las que, partiendo del núcleo de hidrógeno, permiten que se formen por etapas núcleos de helio. Las temperaturas necesarias para ello no rebasan los 10 millones de grados. ¿Y no es éste el orden de temperaturas que se calcula que poseen las estrellas más numerosas de la secuencia principal, en particular el centro de nuestro Sol? Con ayuda del cálculo se llegará al siguiente resultado simple: como nuestro Sol, la gran mayoría de las estrellas sólo pueden efectuar las reacciones nucleares que utilizan la fusión de cuatro núcleos de hidrógeno para producir un núcleo de helio. Ésa es la explicación de la "secuencia principal" en la clasificación de las estrellas: todas las estrellas que figuran en ella dirigen sus esfuerzos a la síntesis del helio. Su dispersión en el diagrama H-R. no traduce más que la variedad de sus masas. Las más grandes brillan mucho y por lo tanto gastan rápido su combustible nuclear y mueren jóvenes. Las medianas o pequeñas, como nuestro Sol, brillan menos pero duran mucho más tiempo.

Todos los demás elementos químicos, del carbono al silicio, del hierro al uranio, se formaron en otras estrellas especiales más interesantes pero también más complejas y en consecuencia menos abundantes. Mucho más grandes también, pues hubo que alcanzar los 100 millones y posteriormente los 1 000 millones de grados para producir elementos tan pesados como el hierro, y los elementos aún más pesados sólo fueron sintetizados durante ciertas explosiones de supernova en las que, durante un breve lapso (una fracción de segundo), la temperatura puede elevarse hasta 10 mil millones de grados.

Por ello hoy sabemos que la totalidad de los átomos complejos que conocemos (es decir, todos los átomos salvo los de helio e hidrógeno) se formaron en 5% de las estrellas visibles. A estas estrellas "especiales" se les llama gigantes rojas o supergigantes rojas, o también, en el caso de las estrellas explosivas, novas o supernovas. En estas inmensas "ollas" se cocina toda la materia "noble" que nos rodea, desde el carbono, que forma parte de nuestro cuerpo; o el silicio, que forma parte de las rocas; hasta el oxígeno, el elemento más abundante en la Tierra, mediante reacciones nucleares más o menos complejas a temperaturas muy elevadas. Y si nacieron en estas estrellas, ¿qué itinerarios siguieron para llegar hasta nuestro cuerpo?

Vida y muerte de una estrella

La respuesta reside en la segunda parte del escenario estelar que idearon los astrofísicos.

La historia de la vida de las estrellas se inicia bajo la forma de una gran masa rojiza a la que se denomina T.Tauri. Tras algunos millones de años bajo esta forma, empiezan a fabricar helio y se sitúan en la "secuencia principal" del diagrama H-R. Al igual que nuestro Sol, todas inician su "vida nuclear" "quemando" hidrógeno para fabricar helio. Luego, tras duraciones variables (más cortas mientras más grande es la masa), evolucionan. En casi todas, esta evolución es extraña. Su núcleo se encoge y por lo tanto se calienta;[15] simultáneamente, su corteza se dilata, se agranda, se pone rosada y luego roja; entonces se convierten en gigantes rojas (nuestro Sol se convertirá en una de ellas dentro de 5 mil millones de años).

La estrella se transforma así en un reactor nuclear complejo, estratificado, en el que, del exterior al centro, se producirán reacciones cada vez más complejas. En la periferia arde el hidrógeno y las temperaturas alcanzan varios millones de grados, mientras que en el centro alcanzan los 1 000 millones de grados y en esa extraordinaria hornaza se producen núcleos de silicio o de fósforo, e incluso de hierro.

Posteriormente la estrella seguirá evolucionando, lo que la llevará a su muerte, que también estará predeterminada por su masa. Si es muy grande —digamos, 10 veces más grande que el Sol—, los días de la gigante roja acabarán mediante una explosión súbita y grandiosa que sintetizará en un instante todos los elementos pesados y los proyectará hacia todos los confines del Universo. Se trata de una explosión de la supernova. El núcleo de la estrella se contraerá y transformará en una estrella de neutrones degenerada que gira sobre sí misma y lanza a todos los rumbos del Universo señales de radio periódicas como un verdadero reloj. Se le llama entonces *pulsar*.[16] Pero si tiene una masa igual o inferior a la del Sol, la estrella vieja se contraerá y, bilitada, palidecerá hasta transformarse en una pequeña estrella discreta, una enana blanca.

La materia estelar tiene así dos destinos posibles: la inseminación del espacio interestelar mediante las explosiones de supernovas, o el desplome sobre sí misma para terminar en un minúsculo punto invisible. Supernova o enana blanca: tales son las dos muertes posibles de una estrella.

En ambos casos, la materia enriquecida con nuevos elementos quí-

[15] Cuando una nube de gas (o de polvo) se contrae bajo el efecto de la atracción mutua de las moléculas (o de los granos), por la ley de gravitación, las moléculas y los granos chocan y crean así calor.

[16] Los pulsares son fuentes de radio que emiten las señales de manera pulsada con gran regularidad. Normalmente esos "relámpagos de radio" duran 10 milisegundos y están separados por intervalos de 33 milisegundos a 4 segundos. Fueron descubiertos en 1968 y hoy se considera que son estrellas de neutrones.

micos regresa al espacio interestelar, donde vagará, se mezclará y encontrará con otros materiales provenientes de otras estrellas. Esta materia interestelar se enriquecerá poco a poco con nuevas aportaciones que a su vez se mezclarán. Un día, una porción de esta materia interestelar se agrupará y aglomerará de nuevo por el simple efecto de la fuerza de gravitación y engendrará una nube interestelar de gases y polvo y, finalmente, una nueva estrella,[17] misma que, tras su juventud como T. Tauri, quemará primero su hidrógeno, iniciará la secuencia básica y comenzará entonces una nueva vida estelar.

Así fue la historia de nuestro Sol. En su interior se alojan átomos pesados, que él no puede sintetizar por sí mismo y que por lo tanto heredó de otros episodios anteriores. En su caso, brilla quemando su hidrógeno modestamente, en espera de que llegue su fin, dentro de 5 mil millones de años.

En la inmensidad del cielo, a merced de repetidos ciclos estelares de múltiples mezclas interestelares, se formó la diversidad química del Universo, siguiendo el ritmo de la vida y la muerte de las estrellas. Este escenario grandioso integra en un todo coherente las observaciones astronómicas, los datos sobre las reacciones nucleares que obtuvieron los especialistas en física nuclear en los aceleradores de partículas, los porcentajes en que se presentan los elementos químicos, así como las proporciones de los diversos isótopos que los constituyen. ¿Quiere decir que explica toda la diversidad de las estrellas? Lejos de ello. Sin embargo, nos ofrece un marco, un paradigma unificador que permite continuar con la exploración.

Exploradores del cielo

Después de las estrellas, los exploradores del cielo trataron de comprender lo que había entre éstas, en ese misterioso espacio a menudo vacío en el que a veces sólo se encuentra una molécula cada centímetro cúbico.[18]

Los astrónomos clasificaron estas sociedades de miles de millones de estrellas a las que se conoce como galaxias. Algunas tienen forma espiral y unos brazos, especie de filamentos torcidos; otras son alarga-

[17] Cuando una nube de gas se concentra, las diversas moléculas que la componen están sometidas a dos fuerzas: la agitación térmica, que tiende a dispersarla en el espacio, y la atracción gravitacional. Por arriba de cierta masa y de cierta densidad, la gravitación predomina y la nube compacta, mediante un proceso bastante brutal.

[18] Los planetas tienen densidades que van de 5 a 3 g/cm^3; el Universo tiene una densidad promedio de 10^{-30} g/cm^3; las galaxias, de 10^{-24} g/cm^3; y las nubes interestelares, de entre 10^{-22} y 10^{-15} g/cm^3.

das; y otras más son redondas como un corazón. ¿De qué manera se organizó y evolucionó todo esto? Ahora ya puede responderse a estas preguntas, pues los instrumentos de observación se han perfeccionado de manera extraordinaria. Desde el fin de la segunda Guerra Mundial, en el marco de las investigaciones sobre los radares militares, se desarrolla la radioastronomía, con sus grandes antenas atentas a las señales de radio del cielo, y se descubren numerosas fuentes de radio cósmicas. Se confirma también que el cielo emite en otros campos de longitudes de onda.[19] A partir de 1960 asistimos al desarrollo de la astronomía infrarroja. Durante el decenio de 1970 presenciamos el crecimiento de la astronomía de rayos x, luego rayos g y por último ultravioletas. Se inicia entonces una nueva serie de campañas de observación del cielo con nuevas técnicas, y las comparaciones entre los diferentes resultados generan nuevas informaciones. Luego aparecen las observaciones espaciales con satélites y sondas interplanetarias, que permiten a la astronomía ir más allá de la atmósfera terrestre sin depender del mal tiempo, las nubes, etc.: por ejemplo, el satélite X Uhuru, o los satélites de rayos infrarrojos, ultravioletas, etc., hasta llegar al telescopio espacial Hubble, todos ellos basados en la electrónica y la informática modernas. De ese flujo constante de resultados sacaremos algunos ejemplos, destinados más bien a dar una idea de ese movimiento que a describirlo.

Los radioastrónomos descubren que en las nubes interestelares que, según se creía, estaban compuestas de hidrógeno, helio y un pequeño porcentaje de elementos pesados, se encuentran moléculas complejas, alcoholes y aminoácidos, es decir, los ladrillos fundamentales de la materia viva. Esto bastará para que se empiece a especular sobre la posibilidad de existencia de vida extraterrestre. A ello se añadirá la existencia de nubes de polvo de granos interestelares. También se señalará la existencia de los famosos "hoyos negros", objetos cósmicos con tanta masa que atraen a los rayos luminosos, los hacen curvar-

[19] La luz visible, que es la que detectan nuestros ojos, forma parte de la categoría de las ondas electromagnéticas. Estas tienen vibraciones inmateriales que atraviesan el espacio a partir del lugar en que son emitidas, a una velocidad de 300 000 km por segundo (velocidad de la luz). Se clasifican de acuerdo con su longitud de onda o lo inverso, es decir, su frecuencia. Las ondas cuya longitud de onda es de 10^{-10} metros (de una frecuencia de 10^{18} hertz, correspondiendo un hertz a una vibración por segundo) son los rayos x que se utilizan en medicina o en mineralogía. Aquellas cuya longitud de onda está entre 4.10^{-7} y 8.10^{-7} metros son las ondas luminosas (su frecuencia es de 10^{15} hertz). Las que van de un centímetro a 1 000 kilómetros de longitud de onda (frecuencia de entre 10^{10} y 10^{3} hertz) son las ondas de radio. La radio común y corriente utiliza ondas que van de 1 metro (FM, y televisión) a 1 kilómetro de longitud. Estas ondas de radio no sólo son producidas por el hombre sino que pueden ser emitidas en forma natural por las estrellas y estudiadas por los astrónomos con ayuda de los telescopios. Todas estas ondas son especies de "luces" a las que se denomina radiación electromagnética.

se sobre sí mismos y les impiden salir, lo que provoca su ausencia de color, la "negrura" que los hace invisibles.[20] ¿Pero entonces, cómo detectarlos? Por su masa, que atrae objetos. Por ello, en ciertas regiones del Universo se ve que algunas estrellas giran alrededor "de nada", pero tan rápido que lanzan emanaciones continuas de rayos x; incluso en ciertas zonas se observa cómo algunas galaxias son atraídas por un gigantesco hoyo negro en el que un día desaparecerán por completo. ¿Y que hay de nuestra galaxia? Una angustia cósmica pero una perspectiva lejana. ¿Morir en un hoyo negro? Onirismo freudiano, comenta el astrónomo George Greenstein.

También están los misteriosos cuasares,[21] que emiten señales de radio y señales luminosas de una enorme intensidad, pero que parecen ser centros de galaxias a veces desdobladas por efecto de curiosos espejismos, cuya poderosa emisión de energía se relaciona con la existencia de hoyos negros en su centro.

Esta astronomía moderna, que mide las distancias en años-luz o en *parsecs* (es decir, 3.26 veces un año-luz), nos enseña más sobre el Universo y su historia de lo que jamás pudimos haber soñado con saber.

La dilatación del tiempo

Esta extraordinaria visión del cielo nocturno, con sus estrellas y sus galaxias dispersas en el espacio, constituye un campo histórico. La luz atraviesa el espacio a la velocidad de 300 000 km por segundo y su mensaje proviene de objetos alejados de nosotros a veces 1 000 años, a veces 100 millones, o miles de millones de años, etc. Cuando decimos que "hoy" observamos la explosión de una supernova en la nube de Magallanes, estamos viendo un hecho que sucedió hace 170 000 años. Las galaxias con una antigüedad de 12 mil millones de años-luz que observamos son los testigos de la antigüedad cósmica.

Esta pintura astronómica es heterócrona. Mirar lejos es ver en el pasado más antiguo: la observación astronómica es una máquina de remontar el tiempo. Y si nada parece vedado a la investigación del hombre, resulta muy natural querer dar un paso más y plantear la pregunta última: y el Universo, ¿de dónde proviene?, ¿cómo se formó? o,

[20] La existencia de los agujeros negros, imaginada por los teóricos, en particular Chandrasekhar o Schwarzschild (sin contar a Laplace), fue revelada por diversas observaciones, especialmente las del satélite *X Uhuru*.

[21] Significa "casi-estelar". Son objetos muy brillantes, incluso demasiado brillantes para su distancia. Emiten también radiaciones de radio y constituyeron durante mucho tiempo uno de los misterios de la astronomía. Actualmente se considera que se trata del nacimiento o de la muerte de una galaxia.

más precisamente, ¿cómo apareció el hidrógeno, base de todo el escenario estelar?

Big Bang

A principios del siglo xx se pensaba que el Universo era isótropo, homogéneo, estacionario, infinito y eterno. Einstein estaba tan convencido de ello que cuando propuso su teoría de la relatividad general introdujo artificialmente una constante cosmológica. Este artificio pronto fue señalado por el ruso Friedman y por el sacerdote belga Lemaître, quienes afirmaban que el universo se hallaba en expansión.

Seguramente esta hipótesis se habría quedado como una mera especulación si el astrónomo estadunidense Edwin Hubble no hubiera observado a partir de 1929, con ayuda del par de grandes telescopios californianos recién instalados en monte Wilson y luego en Monte Palomar, las galaxias lejanas que con nuestros instrumentos de observación se veían sólo como pálidos puntos luminosos. Basándose en un efecto óptico llamado efecto Doppler,[22] comprobó que las galaxias se alejan unas de otras y que entre más alejadas están lo hacen más rápidamente. De aquí dedujo Hubble que en el pasado habían estado reunidas en un mismo sitio y luego se alejaron. Pese a que según toda evidencia estas observaciones parecían confirmar las ideas de Lemaître y de Friedman, Hubble fue prudente y se cuidó de hacer cualquier interpretación teórica demasiado audaz.

Fue George Gamow quien, en 1948, integrando todos los progresos recientes de la física del núcleo y enterado de los cálculos de Friedman (de quien fue alumno) y Lemaître, propuso la hipótesis de un Big Bang: un evento de elevadísima temperatura, muy repentino, que según él, permitió la creación de la materia del Universo. Este suceso debió ser tan intenso que tuvo que dejar una huella en el Universo actual, una vibración residual, un "ruido" que se ha ido apagando con el tiempo. Traduciendo esto en términos de temperatura, en la teoría del cuerpo de negro de Planck, esta vibración debía corresponder a 7K (-266grados C).[23]

[22] Cuando un objeto se aleja de un observador, las frecuencias de sus vibraciones parecen "alargarse". De este modo, un tren que se aleja emite un ruido sordo (mientras que un tren que acerca emite un ruido claro). En lo relativo a la luz, este efecto, descubierto por Doppler, llevó a correr los espectros hacia el rojo. A la inversa, este corrimiento permitió calcular la velocidad de alejamiento del objeto luminoso.

[23] Un ruido es una agitación sonora desordenada. Por analogía, los físicos llaman ruido a cualquier conjunto de vibraciones sin coherencia. Así fue como se detectó la existencia de una vibración de radio cuando se apuntó una antena de radio hacia el cielo. El lazo entre ruido y temperatura puede parecer más misterioso. La temperatura es una medida de la agitación de los

El razonamiento de Gamow despertó interés pero no convenció. Desde el fin de la segunda Guerra Mundial, los tres ingleses Bondi, Gold y Hoyle desarrollan una teoría opuesta, llamada de creación continua. Según ésta, en el Universo continuamente se está formando materia a un ritmo modesto pero suficiente para compensar la disminución de densidad debida a la expansión. En la década de 1960, esta teoría pareció recibir la aprobación de la mayoría de los científicos y fue defendida por Fred Hoyle, uno de los astrofísicos más fecundos y dinámicos de la época, lo que significó un triunfo nada despreciable para sus partidarios.

Sin embargo, la teoría del Big Bang triunfará por nocaut. Una vez más, el descubrirmiento es obra del azar. Dos físicos que trabajan para la compañía estadunidense Bell Telephone observan el cielo con una antena-radar y se dan cuenta de que, sin importar la dirección del cielo hacia la que dirijan la antena, siempre se registra un "ruido parásito", una especie de ronroneo. Al analizarlo en longitudes de onda, este ruido corresponde a una temperatura de 3K (cercana a la que había previsto Gamow). Sin comprender aún muy bien el fenómeno, nuestros físicos lo comentan con sus allegados. Dicke, de Princeton, les dice que también él está en busca de ese "ruido cósmico" para probar la teoría de Gamow. Al revelarles la interpretación de sus observaciones, Dicke cede la gloria a Penzias y Wilson.[24] Este descubrimiento desata un mar de fondo que hará que todo se sumerja.

El Big Bang se impone; Hoyle lo admite públicamente y Penzias y Wilson reciben el premio Nobel. Desgraciadamente, ni Lemaître ni Gamow asistirán a su triunfo, pues ha habían muerto para entonces.

Los tres primeros minutos del Universo

Con Gamow, la física de lo infinitamente pequeño hizo grandes progresos. Desde la década de 1960 se le llama física de las partículas elementales y se ha desarrollado gracias a los experimentos efectuados con aceleradores cada vez más gigantescos y en asociación con teorías difíciles que pretenden comprender la naturaleza de las fuerzas del

átomos. A una temperatura alta, los átomos están muy agitados; a una temperatura baja, están más tranquilos y en el cero absoluto están en reposo. Ahora bien, la agitación de los átomos se traduce en múltiples vibraciones. Los físicos saben que la temperatura y las vibraciones de los átomos están ligadas. Por analogía, puede hacerse corresponder una temperatura con un espectro de vibraciones. En el caso presente, una vibración de siete grados absolutos es una vibración muy amortiguada, pero existente.

[24] De hecho, un alumno de Dicke Jim Peeble acaba de calcular precisamente que "la temperatura residual del Big Bang" debió ser de 3 o 4 K y no de 7.

Universo.[25] Con estos antecedentes, ¿cómo no sentirse tentado por una explicación o, mejor aún, por una descripción del Big Bang? Provistos de las teorías más recientes de la física de las partículas, algunos astrofísicos se lanzarán a esta audaz empresa.

Para intentar construir un escenario del desarrollo del Big Bang, los especialistas en física de las partículas y los astrofísicos se apoyan en dos teorías: la relatividad general, que describe la expansión del Universo, y la mecánica cuántica (con su prolongación hacia la física de las partículas: la cromodinámica). Estas teorías señalan, de entrada, un límite a sus ambiciones, y el principio de incertidumbre de Heisenberg introduce, como su nombre indica, una incertidumbre sobre nuestras posibilidades de conocer el tiempo: es imposible saber nada por debajo del tiempo de Planck, igual a 10^{-43} de segundo.

El escenario comienza con lo que los físicos llaman la era de las partículas, que durará un segundo. En condiciones de temperaturas vertiginosas que se miden en 10^{28}, 10^{20} o 10^{16} K, aparecerán los quarks, que se agruparán en protones y neutrones, y más tarde los electrones, los neutrones y los fotones. Al mismo tiempo, este medio cálido y denso se dilatará y por tanto se enfriará a una velocidad muy grande.

La fase siguiente es la nuclear y dura mucho tiempo, es decir, unos tres minutos (!), durante los cuales nacen elementos ligeros —helio, litio— a través de las reacciones nucleares clásicas.

Mientras prosigue la expansión del Universo comienza otra fase, llamada radiativa o brillante, que dura 300 000 años y en la que se inicia la expansión del Universo en la forma que conocemos, pero durante la cual permanece opaco. Esta materia informe, lanzada en todas direcciones, se organizará al mismo tiempo que se dispersa. Surgen así, sucesivamente, nubes galácticas, galaxias y estrellas, y poco a poco nuestro universo observable se muestra como algo homogéneo, transparente y perfectamente simétrico. Al menos eso es lo que afirma la teoría.

Cabe recordar que este escenario sigue siendo una especulación que, si bien satisface las exigencias de coherencia de las teorías físicas, en realidad no ha superado la prueba de las observaciones.

¿Cuándo se produjo el Big Bang?

A partir de los datos sobre el alejamiento de las galaxias, pero también de la desintegración radioactiva de los elementos sintetizados en las

[25] Se sabe que hay cuatro fuerzas en el Universo: la fuerza de gravitación, la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear y la fuerza nuclear débil. Véase nuestro capítulo "Cuánticas" y Steven Weinberg, *Les Trois Premières Minutes de l'Univers*, París, Seuil, 1980.

estrellas, se ha podido calcular que se remonta a 12 o 15 mil millones de años, cifra considerable si se la compara con la duración de la vida humana o incluso con la fecha de aparición del hombre, hace 4 millones de años, pero que no parece gigantesca en comparación con la edad de la Tierra, que es de 4.5 mil millones de años, o incluso con la aparición de la vida, hace 3.4 o 3.8 mil millones de años.

De este modo el mundo fue reinventado... ¡Qué gran éxito! Sobre todo considerando que, por primera vez en la historia de la ciencia, las autoridades religiosas quedaron satisfechas. La existencia del Big Bang demuestra que existe un instante cero, que el tiempo es "vectorial" y no cíclico y que las religiones judeocristianas son verdaderas,[26] pues son las únicas que incluyeron en su dogma este escenario.

Pero ¿qué había antes del Big Bang? ¿Existía Dios en la nada? Algunos han respondido sin pestañear que antes del Big Bang no había nada. Otros, más prudentes, propusieron el escenario del Big Crunch, que propone la existencia de un universo anterior al Big Bang que, tras haberse inflado y extendido, empezó a contraerse. La atracción gravitacional superó a la fuerza de expansión, haciendo que se encogiera sobre sí mismo hasta parecerse a una cabeza de alfiler, con lo que se inició al mismo tiempo el Big Bang. Según esta hipótesis, además, el mundo es cíclico y está formado por episodios sucesivos de Big Crunch y Big Bang. La edad del "verdadero Universo" es infinita y la historia un eterno volver a empezar. El vaivén del universo de los egipcios y chinos se pone otra vez de moda.

¿A quién creerle? Estamos buscando indicios que pudieran anunciar un futuro Big Crunch para nuestro Universo actual. Esto dependerá de su masa, pero ¿cómo determinarla? El examen detallado de los movimientos de las galaxias permite suponer que además de la materia visible que emite radiaciones luminosas y que fotocopiamos en la forma de estrellas y galaxias en nuestros telescopios, existe una materia invisible, "negra" como se le llama, tal vez más abundante aún. ¿De qué está hecha? ¿De neutrinos?[27] ¿De familias de "hoyos negros"? Nadie lo sabe, ¿Cuál es la importancia de esta materia negra? Los científicos miden, calculan, especulan.

El escenario del Big Bang sigue en pie: ¡permite explicar tantas cosas!

[26] La existencia de un instante cero, de una creación, se considera una prueba de la validez de las creencias judeocristianas por oposición a las religiones cíclicas de los sumerios, egipcios y chinos. El papa Pío XII aprovechará este argumento en sus homilías, pese a las advertencias que le hizo el padre Lemaître. Pierre Chaunu (protestante) se convertirá también en propagandista de esta tesis.

[27] Son partículas elementales eléctricamente neutras y cuya masa es muy pequeña. Por ello son muy difíciles de detectar, pero transportan *spin*. Se supone que el Sol debe emitirlas; de allí los complejos y costosos experimentos para medir los neutrinos solares.

Espuma de universo

Y sin embargo, si el escenario estándar del Big Bang no fue admitido antes (hacia la década de 1980), fue porque las observaciones astronómicas acumuladas durante diez años y brillantemente confirmadas por el telescopio espacial, vinieron a sembrar la duda acerca de esta notable construcción.

Contrariamente a la hipótesis básica propuesta en las versiones sucesivas de este escenario, el Universo no es ni isótropo ni homogéneo.[28] La cartografía del cielo muestra que la materia se reparte en las "paredes" de gigantescas "burbujas de vacío". El universo parece ser una enorme espuma hecha de grandes burbujas de vacío cuyas paredes estarían constituidas por acumulaciones de estrellas: se acabó la simetría perfecta, la isotropía del Universo. Un examen atento del alejamiento de las galaxias revela incluso que parte de la luz que nos llega es mucho más antigua que la "edad admitida para el Universo", que es del orden de 12 mil millones de años. ¿Significa que la datación que se ha obtenido con el método de Hubble es sólo la de un Big Bang local? ¿Que nuestro universo visible no es más que una gran burbuja entre muchas otras, más numerosas y lejanas?

Se construye entonces el escenario de un "Small Bang" que sucedió a un "Small Crunch": según éste, el "inicio" no fue tal vez sino un "pequeño inicio", restringido a una pequeña parte del Universo, la que hemos podido observar, un episodio banal que sucedió a otro episodio banal. La creación de la materia primitiva, entonces, sería muy anterior, y la teoría de un universo de ritmo cíclico volvería a tomar la delantera.

¿Es necesario construir una nueva cosmogonía? ¿Sólo hace falta retocar un poco el escenario estándar del Big Bang? La respuesta vendrá del cielo. Los astrónomos disponen hoy en día de un extraordinario conjunto de técnicas; observan el cielo en todas las longitudes de onda a partir de la Tierra y del espacio con ayuda de aparatos que, gracias a los detectores modernos integrados a la computadora, permiten hacer observaciones más numerosas y cada vez más precisas. Con toda seguridad, estas nuevas observaciones del cielo nos darán la respuesta. Entonces habrá que inventar un nuevo modelo o mejorar el que ya existe: confirmarlo o invalidarlo.

Así proseguirá el diálogo entre el hombre y la naturaleza, el vaivén entre la observación y la teoría.

[28] En un universo simétrico e isótropo, se supone que la densidad de materia es idéntica en todas las direcciones.

La dura ley de las ciencias ordena vivir con rigor, pero dentro de lo provisional. Un modelo bello puede quedar invalidado en cualquier momento por la observación, a pesar de su belleza.

Sea como sea, los resultados ya obtenidos por la astronomía moderna —que en adelante se confunde con la astrofísica— son extraordinarios.

Tal como afirman numerosos astrónomos, como Linde en Estados Unidos o Nottale en Francia, el Universo se nos muestra como una inmensa estructura fractal constituida en buena parte por vacío que separa estructuras jerarquizadas. Estrellas, galaxias, masas galácticas, universos (en plural); en cada nivel hay ciertos tipos de objetos cuya naturaleza es idéntica pero con una realidad variada; en cada nivel hay reglas de organización. El Universo se parece a un sistema jerarquizado, a un organismo vivo donde la materia está organizada. ¿Estas leyes de escalas descubiertas en el nivel de la materia "común" se aplican también a su escala? ¿No es, por otra parte, el único medio donde las energías que intervienen permitirían probar las teorías sobre las fuerzas fundamentales de la naturaleza y las leyes que rigen las partículas elementales? Este universo que apenas empezamos a explorar se presenta quizá como el gran laboratorio de mañana.

IX. LA TIERRA COMO SISTEMA

DURANTE SUS DOS SIGLOS de existencia, las ciencias de la Tierra se han dividido en dos bandos: por un lado, los geólogos, preocupados por la historia de la superficie escrita en las rocas; y por otro, los geofísicos, interesados en la estructura de las profundidades.[1]

Unos, naturalistas, usaban métodos de observación cualitativos directos; otros, los matemáticos y físicos, escudriñaban el interior invisible de la Tierra con ayuda de mediciones físicas indirectas y de modelos cuantitativos, a menudo muy alejados de la realidad.

Ambas comunidades se ignoraban una a la otra; sólo se unieron para refutar a Wegener.

Sin embargo, esta situación cambiará progresivamente. Los geólogos se volverán cuantitativos y los geofísicos se acercarán a los hechos y se interesarán en la superficie; así se constituirá, paso a paso, lo que hoy día llamamos las geociencias.

RADIOCRONOLOGÍA

La primera revolución que afectará a la geología será el perfeccionamiento de los métodos de datación absoluta basados en la radioactividad; después vendrá la generalización de los mismos. Es posible atribuir cierta edad a una roca, edad que se atribuirá también al terreno; o bien calcular la duración de un fenómeno geológico y, en consecuencia, estimar su velocidad. De cualitativa, la geología se convierte en cuantitativa.[2]

Es verdad que el principio en el que se basan estos métodos ya había sido propuesto por Rutherford en 1912, pero los innumerables problemas analíticos que se suscitaron habían postergado su utilización.

No fue sino hasta los años cincuenta cuando los geólogos tuvieron

[1] Desde principios del siglo XIX sabemos que la Tierra está formada por una serie de capas, contenidas unas en otras según su densidad: en el centro está el núcleo, después el manto, la corteza, el océano y la atmósfera.

[2] El método de datación más conocido es el del carbono 14. En realidad, este método tiene limitaciones considerables en cuanto al tiempo que puede medir (menos de 30 000 años). Los métodos de datación más comunes en geología se basan en el rubidio 87, que al desintegrarse se convierte en estroncio 87; en el uranio, que se convierte en plomo; o en el potasio 40, que se desintegra en argón 40.

verdadero acceso a estos métodos. De inmediato se obtuvieron resultados asombrosos, unos tras otros.

En 1953, Patterson descubrió que la edad de la Tierra era de 4.55 miles de millones de años, lo que descartaba en definitiva las estimaciones de lord Kelvin.[3] En forma paralela, Patterson comprobaba que los meteoritos, las rocas que caen del cielo,[4] tienen la misma edad que la Tierra, son testigos de nuestros orígenes, de lo que "ocurrió" cuando surgió el Sistema Solar.

Se descubrió también que las primeras rocas con fósiles, objeto de estudio de la geología clásica, databan cuando mucho de hace 550 millones de años, ¡con lo que se comprobó que la geología clásica ignoraba el 90% de la historia de la Tierra! ¿Habíamos sido víctimas de una extraordinaria miopía? Se pone en duda la validez de la hipótesis de la geología estacionaria de Hutton, según la cual la Tierra tenía una historia cíclica que se repite indefinidamente.[5]

Más tarde se descubrirá que no existen rocas terrestres que rebasen los 4 mil millones de años, de modo que las rocas que se formaron durante los primeros 500 millones de años de historia de la Tierra fueron destruidas, quedaron sumidas en las profundidades o bien fueron "canibalizadas", "reutilizadas" por las rocas jóvenes.

Se fecharán, es decir, se identificarán, las superficies terrestres con una edad que va de 550 millones hasta 4 mil millones de años: terrenos sin fósiles, a menudo muy metamorfoseados, ante los cuales quedaba muda la geología clásica. Gracias al estudio de estos terrenos, la geología va a distinguir los periodos de larga duración, de lentas evoluciones.

Pero esta radiocronología servirá asimismo de apoyo a las técnicas clásicas de la geología. Se establece ahora una cronología en tiempo absoluto de escala geológica con eras y etapas,[6] y se establece la edad de las diferentes faunas y floras fósiles que se modifican en el trans-

[3] Recordemos que lord Kelvin (cuyo nombre civil era W. Thomson) calculaba que la edad máxima de la Tierra era de 100 millones de años.

[4] El origen de los meteoritos dividió a los sabios del siglo XVIII y de principios del XIX. ¿Cómo es posible que una piedra sólida pueda caer del cielo gaseoso?, se preguntaba B. Franklin. No fue sino hasta después de la caída de un meteorito cerca del pueblo de L'Aigle, y del informe de una comisión designada por la Academia de Ciencias de París (dirigida por J.-B. Biot) que se aceptó el origen "cósmico" de los meteoritos.

[5] Hutton decía: "ningún vestigio del principio, ningún signo de un fin". ¡Con los meteoritos, no obstante, se dispone ya de vestigios del principio!

[6] Las eras son: Primaria (570-235 ma), Secundaria (235-65 ma), Terciaria (65-4 ma), Cuaternaria (4-0 ma); ma = millones de años. Las etapas en las que el principio y el fin de las edades se indican a su vez en ma (millones de años) son, en la era Primaria, 570 ma, Cámbrico 500, Ordovícico 435, Silúrico 395, Devónico 345, Carbonífero 280, Pérmico 235; en la era Secundaria, 235 ma, Triásico 145, Jurásico 141, Cretácico 65; en la era Terciaria 65 ma, Paleoceno, Eoceno, Oligoceno, Mioceno, Plioceno.

curso del tiempo, con lo que se convierten en marcadores cronológicos cuantitativos.

Con ayuda de los fósiles puede calcularse, entonces, la velocidad de los fenómenos geológicos; se demuestra que para erosionar una montaña y transformarla en planicie, se requieren cerca de 30 millones de años; que la velocidad de sedimentación fluctúa entre 100 y 1 milímetro cada mil años, etcétera.

Entre todas las fechas de fenómenos determinadas por los geólogos, desempeñará un papel importante la de las inversiones del campo magnético terrestre, que quedaron grabadas en las rocas volcánicas.[7]

Paleobiología

La radiocronología infundió también nuevo rigor a esta apasionante ciencia que reconstruye la evolución de la vida en la Tierra con ayuda de los restos fósiles: la paleontología.

Se encuentran rastros de vida dispersos a lo largo del periodo que va de 3.4 a 0.55 mil millones de años: restos de algas, arrecifes, signos enigmáticos. En resumen, nada espectacular, pero suficiente para comprobar que la vida se instaló en la Tierra apenas mil millones de años después de su formación.

La naturaleza de las rocas y su grado de oxidación revelan que durante casi dos mil millones de años la atmósfera terrestre careció de oxígeno. Predominaban el gas carbónico y el nitrógeno. Y de pronto, hace 2 mil millones de años, apareció el oxígeno y rápidamente pasó a formar 10% y después 20% de la masa atmosférica. Esta fecha parece marcar la aparición masiva de la síntesis clorofílica, que permite a las plantas verdes absorber el CO_2 y desechar el oxígeno. El oxígeno de la atmósfera propicia que se presenten los fenómenos de oxidación y, por consiguiente, de respiración. Entonces podrá empezar a desarrollarse la vida animal.

Sin embargo, sólo se encontraron "bichos" en los terrenos que datan de 700 millones de años, en Ediacara, Australia: lombrices, medusas, corales. La vida animal hace explosión hacia los 550 millones de años, en los linderos de lo que se llama, en términos geológicos, el Cámbrico.

Durante mucho tiempo se creyó que la vida había evolucionado paulatinamente, enriqueciéndose en cada época la diversidad de los

[7] Las inversiones del campo magnético terrestre fueron descubiertas por el francés Brunhes en 1906. Nadie le creyó. Las volvieron a descubrir Cox y Doell, quienes con la ayuda de Dalrymple, van a elaborar el catálogo cronológico.

seres vivos. Gracias a los estudios que realizó el canadiense Whitington con los fósiles contenidos en los esquistos de Burgess, se comprobó que desde hace 550 millones de años ya existían todos los principales grupos de animales: cordados, insectos, moluscos, celenterados.[8] Desde entonces sólo han evolucionado, una especie remplaza a otra, una familia a otra, pero sin que aumente notablemente la diversidad de los seres vivos.

A partir de ese punto, las especies evolucionarán según la combinación "neodarwiniana" de mutación-selección; esta evolución, sin embargo, no se realizó de manera tranquila, no siguió un ritmo uniforme, sino que estuvo modulada por gigantescas catástrofes climáticas de origen volcánico[9] (o cósmico).

Se vuelve a descubrir entonces la teoría de las catástrofes de Cuvier, que Lyell creía haber sepultado en las catacumbas de la historia.

De este modo, los dinosaurios, que reinaron en el globo terráqueo durante 100 millones de años, majestuosos, poderosos, variados y adaptados de manera admirable a su medio, desaparecieron repentinamente hace 65 millones de años. Junto con ellos se extinguieron las encantadoras conchas espirales torcidas que llamamos amonitas. Junto con otras miles de especies, fueron víctimas del impacto de un meteorito gigantesco, cuyo aterrizaje lanzó al cielo toneladas de polvo que lo oscurecieron y provocaron el enfriamiento de la Tierra.[10]

Esta catástrofe no fue la única; en diferentes épocas se produjeron otras (una decena), en su mayoría de origen volcánico. Así, la evolución de las especies, que se consideraba uniforme y regular, fue en realidad una evolución con pausas, sometida a los avatares de la historia geológica.

Con la cuestión de la desaparición de las especies, la paleontología encontró al mismo tiempo su paradigma. El especialista en graptolitos puede hablar con el especialista en amonitas o en dinosaurios. Todos salen de sus nichos profesionales más o menos empolvados y participan en la única aventura válida para un paleontólogo: entender la evolución de la vida.

Esta evolución se distingue especialmente por el surgimiento del hombre. ¿Cómo aparece éste? ¿De dónde proviene?

El siglo XX añade información esencial también sobre estos asuntos.

[8] *Cf.* S. Gould, *La Vie est belle*, Le Seuil, 1991.

[9] El libro de Vincent Courtillot (París, Fayard, 1995) narra maravillosamente esta importante saga.

[10] Se trata de la famosa transición terciaria cretácica, cuando en forma simultánea a la erupción de las capas de lava volcánica (*trapps*) del Decán, en India, un enorme meteorito cayó a la Tierra en México. La conjunción de ambos fenómenos provocó un invierno planetario de varios miles de años que diezmó las especies por millares.

El hombre es producto de la evolución biológica; como en el caso de los demás animales, es posible encontrar un *phylum* que lo vincula a formas ancestrales y determinar sus relaciones "de parentesco" con otras formas de vida animal.

Desde hace treinta años, la paleontología humana ha progresado en forma considerable gracias a las excavaciones sistemáticas realizadas en zonas de África oriental y, sobre todo, gracias a la aportación invaluable de los diferentes métodos de datación radioactiva, que permitieron ubicar cada descubrimiento en una secuencia temporal apropiada. Con ayuda de la cronología absoluta y la anatomía comparada, esas osamentas sueltas, esos cráneos desfondados y estrellados, esas tibias fracturadas en mil pedazos, esos dientes dispersos, tan valiosos por la información que contienen sobre el tipo de alimentos consumidos, o esos pedazos de hueso de la pelvis, han podido "hablar" y narrar la historia de nuestros orígenes.[11]

Se sabe que hace 4.4 millones de años, en Etiopía o en Kenia, ya existían los australopitecos, nuestros antepasados. Eran monos fuertes, chaparros, grandes consumidores de hojas y frutos. A partir de este tronco principal se diferenció una rama joven: la del hombre. El primer hombre al que se ha identificado es el famoso *Homo habilis,* que el paleontólogo Leakey, del Museo de Nairobi, encontró en los sedimentos de los desfiladeros de Olduvai, en Tanganica, y a quien mediante el método de datación con isótopos de potasio-argón se le determinó una edad de 2.3 millones de años, una estatura de 1.20 m. y un cráneo de 700 cm^3 de volumen.

Este *Homo habilis,* del cual se conocen en la actualidad varios especímenes, coexistió durante mucho tiempo con diversas especies de australopitecos.[12] Es probable que haya aparecido en África, en la zona de los Grandes Lagos, entre –3.5 y –2.2 millones de años, o quizás un poco antes. Mientras que el australopiteco no usaba más que "herramientas" naturales, ramas de árbol o piedras, como lo hace en la actualidad el chimpancé, el *Homo habilis* desarrolló herramientas más sofisticadas; simples guijarros desgajados en un principio, cada vez se volvieron más elaborados. Estos progresos tecnológicos le permitieron el desarrollo de la caza, y así también comenzó sin duda el hombre a construir refugios y a vivir en grupos más numerosos.

Confinado al este de África, el *Homo habilis* sólo había colonizado la zona seca que va de África del Sur a Djibouti. El *Homo erectus,* que le siguió en el *phylum,* descubrió el fuego y conquistó África, Europa, Indonesia y China. Más alto (entre 1.59 m y 1.70 m), más fuerte y con

[11] Véase Y. Coppens, *Le Singe, l'Afrique et l'Homme,* París, Fayard, 1983.

[12] Los australopitecos se extinguieron sin dejar descendencia hace un millón de años.

un cráneo más desarrollado (que sobrepasa los 900 cm^3), el *Homo erectus* es un cazador y un conquistador. Descubre el fuego, habla y se organiza en tribus y "aldeas".

Esta especie es la que dará nacimiento de manera gradual al *Homo sapiens*, al hombre que conocemos en la actualidad, con un cráneo de 2 000 cm^3 y una corteza cerebral muy desarrollada, de frente amplia, estación bípeda "flexible " y pelaje muy ralo.

Constituye el antepasado de todos los hombres sin distinción de raza, color de piel o características específicas. La biología molecular ha determinado sin ambigüedades la genealogía única, con lo que se descartan todas las teorías fantasiosas (y peligrosas) acerca del origen múltiple del hombre moderno según su raza.[13]

He aquí, burdamente bosquejada, la evolución del género humano, que deja sin duda numerosas preguntas en suspenso.

Tectónica de placas

Mientras continuaban los progresos de la geología, se gestaba lo que Kuhn llama una "revolución": la tectónica de placas.

Ya describí esta aventura en otra obra, por lo que me limitaré a esbozar sus rasgos generales y señalar sus aspectos esenciales.[14]

La idea en que se basa surgió de la cartografía magnética de los océanos. En los años sesenta se descubre que las anomalías magnéticas que se registran en el fondo de los océanos constituyen "calcas" horizontales proporcionales a las inversiones del campo magnético terrestre.

Estas irregularidades parecen estar "organizadas" de manera paralela a las largas estructuras volcánicas que atraviesan los océanos y que se conocen como "dorsales oceánicas". En virtud de que dichas irregularidades están fechadas, se llegó a la conclusión de que los fondos oceánicos se extienden de un extremo a otro de la cordillera dorsal.[15] Con ayuda de la escala cronológica de las inversiones, se calcula la velocidad del proceso en varios centímetros por año.

Sobre esta base se funda el modelo de la tectónica de placas.

La superficie del planeta constituye un mosaico formado por cerca de quince placas rígidas de unos 100 km de espesor. La creación de las placas se produjo a lo largo de las dorsales oceánicas. El magma basáltico, surgido de las profundidades terrestres, se enfrió al contacto con

[13] Señalemos la que aseguraba que las diferentes razas de hombres se derivaban de diferentes especies de monos, intentando con ello justificar una "jerarquía" intelectual entre la humanidad.

[14] Claude Allègre, *L'Écume de la Terre*, París, Fayard, 1983.

[15] Extensión de fondos oceánicos, en inglés: *sea floor spreading*.

el agua de mar, formando así el fondo oceánico. Ya solidificado, éste se separó en dos fracciones, que se extendieron simétricamente en relación con la cordillera dorsal.

Las placas se destruyen al hundirse en el manto, en las zonas llamadas de subducción señaladas por las largas fosas submarinas, muy profundas, cuyo eje se hunde en ocasiones a más de diez kilómetros bajo el nivel del mar, como en las regiones de las islas Kuriles, Tonga, Japón, las islas Marianas o Puerto Rico (donde antes se rompían todas las marcas del mundo de inmersión en batiscafo).

Entre las dos zonas donde surgen y se destruyen, las placas tectónicas se comportan de manera rígida y transmiten sus fuerzas sin deformarse. Las fronteras entre las placas son de tres tipos: las dorsales, las fosas de subducción, de las que ya hablamos, y también las gigantescas fallas a lo largo de las cuales corren las placas: las fallas transformantes,[16] como la de San Andrés en California[17] o la del norte de Anatolia en Turquía.

Insistiremos en el hecho de que la topología de placas no coincide con la distribución océano-continente; sin embargo, esta distinción es fundamental, como veremos más adelante.

Océanos-continentes

Los continentes son partes constituyentes de las placas, pero constituyentes inertes. No se crean en las dorsales; no se destruyen en las zonas de subducción, ya que su ligera densidad se los impide; se mueven a la deriva, transportados por el movimiento de las placas que los llevan, participantes en apariencia pasivos en la danza de la tectónica de placas. ¿Pero en verdad no desempeñan ningún papel?

Los continentes pueden fracturarse, romperse y dar origen a un nuevo océano. Los pedazos se mueven a la deriva al compás de las placas que los transportan. De esta manera, a partir del Terciario (–220 ma), el megacontinente Pangea, que existía en ese entonces, se fraccionó para dar origen de manera progresiva a porciones que más tarde se llamarían América del Norte, América del Sur, África, Antártida, Australia, India, y cuyos movimientos a la deriva formarían los océanos Atlántico e Índico.[18]

[16] Son transformantes porque juntan una dorsal con otra dorsal, una dorsal con una fosa o una fosa con otra fosa; en suma, porque "transforman" una estructura "activa" en una de otro tipo.

[17] Que se extiende desde San Francisco hasta el sur de Los Ángeles.

[18] Éste constituye el escenario que había descrito Wegener (excepto en lo que concierne a la India, cuya deriva no había considerado. Este último fue concebido por el geólogo suizo Argand y demostrado por el inglés Keith Runcorn, con ayuda del paleomagnetismo).

Para el geólogo, el aspecto más interesante de estas derivas continentales es el encuentro "brutal" de dos bloques continentales, es decir, la colisión continental. A la velocidad de unos centímetros por año, no debería causar muchos estragos; sin embargo, así fue como nació la zona montañosa de los Himalayas y el Tíbet, cuando India chocó con Asia al moverse a la deriva rumbo al norte. También así nacieron los Alpes, cuando Italia, espolón rocoso de África, penetró en Europa. Las colisiones continentales terminan siempre con una soldadura, una combinación de dos continentes. Así es como los continentes se fracturan aquí y crecen allá, alternancia que va marcando la historia geológica.

En el ciclo de creación/transporte/destrucción de la corteza oceánica (del fondo de los océanos), ciclo básico y original de la tectónica de placas, se injerta otro ciclo: el de los continentes, que está constituido por el dualismo fractura/deriva/colisión. Sin embargo, es importante señalar que el ciclo continental actúa a su vez sobre la tectónica de placas. Un continente puede detener definitivamente el funcionamiento de una zona de subducción al negarse a ser engullido por ella o al entrar en colisión con otro continente, o bien, a la inversa, fracturarse y originar de manera violenta una nueva cordillera dorsal y con ello un nuevo océano.

Los continentes, en apariencia pasivos en la mecánica de placas, resultan, sin embargo, piezas clave en la evolución de la superficie del globo. Su papel pone de relieve que la tectónica de placas no constituye un fenómeno simple, limitado al desarrollo de "plataformas de deslizamiento", sino que, al contrario, se trata de un fenómeno lleno de sucesos imprevistos. El fondo oceánico y su despliegue ponen la regularidad, la monotonía; la corteza continental viene a añadir la fantasía, el azar de los encuentros: en resumen, la belleza fantasiosa de la naturaleza.

Geología

La tectónica de placas permite ubicar los principales fenómenos geológicos en un cuadro coherente.

Los terremotos, tan temidos y a veces mortíferos, se ubican a lo largo de las fronteras entre placas sobre las dorsales submarinas, en las zonas de subducción (Japón, Filipinas, Alaska, México, Perú, Chile, las Antillas), a lo largo de las fallas transformantes (California, Yugoslavia, Turquía), a lo largo de suturas que señalan las colisiones presentes o pasadas (India, Irán, China, el Cáucaso). La mayoría de las erupciones volcánicas, otra amenaza para el hombre, han tenido lugar o bien en

el nivel de las dorsales —aunque por ser submarinas ya no se les ve más (salvo en Islandia)—, o bien en el nivel de las zonas de subducción (Japón, Indonesia, Chile, Perú, México, el Caribe, etcétera.).

Los pliegues en la base de las cadenas montañosas se producen bajo las zonas de subducción, como en los Andes, o bien cuando ocurren las colisiones continentales, como en los Himalayas o en los Alpes.

Como ya vimos, la morfología de los fondos oceánicos también es explicable; las montañas submarinas son las dorsales; las planicies abisales, a 4 000 metros de profundidad, constituyen las superficies de las "plataformas de deslizamiento"; y las fosas oceánicas, las zonas de subducción. El modelo explica asimismo las modificaciones de la geografía de la Tierra en el transcurso del tiempo, de modo que la tectónica de placas constituye una hermosa síntesis que abarca un buen número de fenómenos geológicos.

No obstante, sus métodos tienen limitaciones en cuanto al tiempo, pues se basan en la información magnética registrada en los suelos oceánicos, cuyas fechas datan a lo sumo de 200 millones de años,[19] y los suelos de más edad se encuentran ya engullidos dentro del manto. Sólo los continentes, restos de la superficie del planeta y, en consecuencia, archivos de su historia, nos pueden informar sobre el pasado remoto. Por ello es necesario recurrir a los métodos clásicos de la geología: el estudio de los estratos superpuestos, el desciframiento de las estructuras complejas de las cadenas montañosas, la determinación de la naturaleza de la fauna y la flora. A estas técnicas rejuvenecidas por la cronología absoluta se añade una más, determinante: el paleomagnetismo, es decir, el registro del campo magnético antiguo en las rocas.[20] Este método, que debe mucho a la perseverancia del inglés Keith Runcorn, ha permitido, como ya vimos, redescubrir las inversiones del campo magnético terrestre con las consecuencias que sabemos, y permitirá demostrar que la "danza de los continentes" existía mucho antes de hace 200 millones de años atrás, sin duda durante al menos los últimos 2 mil millones de años. La tectónica de placas parece entonces haber sido la regla del funcionamiento del planeta durante buena parte de su historia, y quizás a todo lo largo de ella.

Para las ciencias de la Tierra, este modelo es extraordinariamente fructífero. Integra gran cantidad de información muy variada y hace converger los intereses de diversas disciplinas, en especial de la geología y de la geofísica, que hasta entonces se ignoraban mutuamente.

En un principio, el movimiento hacia la geología se debió a la

[19] Los fondos oceánicos de esas edades se sitúan en el oeste del Pacífico.

[20] La medición del campo magnético fósil de una roca que se ha datado y tiene orientación permite reconocer la latitud en que se encontraba dicha roca cuando se formó.

acción de un grupo de jóvenes geofísicos, quienes fundaron la tectónica de placas: Fred Vine, Drummond Matthews y Dan Mc Kenzie de Cambridge; Jason Morgan y Tuzo Wilson de Princeton, a quienes se unieron Brian Isaacks, Jack Oliver, Lynn Sykes y Xavier Le Pichon, todos de la Universidad Columbia. Más tarde los habría de seguir el conjunto de la comunidad geológica.

Pese a su carácter general, el modelo de la tectónica de placas está limitado por su objeto mismo: la descripción de los movimientos de placas y, con ello, de los fenómenos geológicos. Geométrico y no físico, el modelo no proporciona los medios para analizar los mecanismos ni las causas de los fenómenos. Su existencia, sin embargo, nos conduce a plantearnos la pregunta: ¿Cuál es la causa del movimiento de las placas?

Geodinámica

La tectónica de placas requiere la intervención de una geodinámica, enfocada forzosamente en las profundidades de la Tierra. Puesto que el manto de la Tierra se mueve, se deforma, convecciona como cualquier cacerola llena de agua, la tectónica de placas no es más que una consecuencia de tales movimientos. Ahora bien, ¿cómo son posibles esos movimientos cuando la sismología supone que el manto es sólido, diferente del magma, pues permite el paso de las ondas de corte?[21]

Con el fin de entender la geodinámica, reuniremos primero las observaciones relativas al interior de la Tierra.

La geofísica tradicional era estática en extremo; cartografiaba con esmero, sin mayores perspectivas, el campo gravitacional y el campo magnético, y estudiaba la propagación de las ondas sísmicas. El objetivo de sus estudios consistía en determinar las estructuras profundas, desmenuzar la estructura de "capas de cebolla" de la Tierra y comprender sus variaciones en función más de la profundidad que de la geografía.

Dichos estudios pasan por una segunda juventud porque, por una parte, adquieren de pronto una finalidad y, por otra, se benefician poco a poco de los progresos tecnológicos. La sismología y el magnetismo verán la multiplicación de estaciones de medición y, en consecuencia, la creación de redes mundiales de observatorios, la gravi-

[21] Las ondas sísmicas (es decir, de tipo acústico) son de tres tipos: las ondas longitudinales (de compresión), las ondas de superficie (que siguen la superficie) y las ondas transversales (que vibran perpendicularmente a su propagación. Los líquidos presentan la propiedad de no "dejarse atravesar" por estas ondas.

metría, y la utilización de las fluctuaciones de los movimientos de los satélites.

A esa información se agregan los estudios sobre el calor que se desprende del interior del planeta.

Se descubre que el manto semeja una enorme caldera que se calienta tanto por la desintegración radioactiva de los elementos potasio, uranio y torio, como por el núcleo, que parece una inmensa caldera cuyas placas son sólo su "tapa".[22]

La cartografía de estos "flujos" de calor de la superficie refleja los movimientos del interior de la Tierra.[23]

Pero estas observaciones resultaban insuficientes para entender las formas y las causas de los movimientos en el interior del planeta.

Para comprenderlas, resulta imprescindible el estudio de los materiales que constituyen las profundidades, así como de sus propiedades. Poco a poco, se han reconstruido en el laboratorio las condiciones de temperatura y presión que rigen dentro del planeta. El reto es enorme: las temperaturas alcanzan los 5 000°C y las presiones son de varios megabarios.[24] No obstante, la tecnología moderna, con su incontenible impulso, lo logró. Después de decenios de enormes esfuerzos, se puede en la actualidad reproducir en el laboratorio el centro de la Tierra. Esta operación tiene lugar entre las pinzas de un pequeño yunque de diamante, sujeto por medio de una palanca y un tornillo y calentado con un rayo láser.[25]

De este modo se descubrirán la naturaleza y el comportamiento del centro de la Tierra, que constituían todavía un misterio en los años sesenta. En cuanto al manto, se trata de materiales sólidos, de cristales, cuya naturaleza se modifica con la presión; los cambios en la estructura cristalina provocan cambios violentos en sus propiedades,

[22] Los elementos potasio, uranio y torio tienen isótopos radioactivos. Como lo descubrieron Pierre Curie y Laborde, la radioactividad desprende calor. Aun cuando es escasa su concentración en la Tierra, estos elementos contribuyen en dos terceras partes a alimentar de energía al planeta.

[23] Cuando una corriente profunda sube a la superficie, desprende calor, cuyo flujo es considerable. Cuando desciende, transporta frío y el flujo de calor es escaso. Una cartografía del flujo de calor muestra la distribución de "corrientes" profundas, ascendentes y descendentes.

[24] La presión que ejerce la atmósfera terrestre sobre la superficie es cercana a 1 bar. Un megabar = mil millones de baros.

[T.] La palabra *barómetro* viene del griego, donde: *Báros* = Presión, *Métron* = Medida. Por lo tanto, es un aparato para medir la presión atmosférica. 1bar=105 Pa. En el sistema internacional de unidades (SI), la presión se expresa en newtons por metro cuadrado; un newton por metro cuadrado es un pascal (Pa). La atmósfera se define como 101.325 Pa, y equivale a 760 mm de mercurio en un barómetro convencional.

[25] Es, en resumen, el triunfo póstumo de Arquímedes, quien después de descubrir el principio de las palancas, decía, "denme una palanca y moveré el mundo". ¡Él mismo inventó el tornillo helicoidal, con el cual se aprietan las dos palancas para obtener la presión!

lo cual permite explicar las violentas variaciones observadas en la propagación de las ondas sísmicas a determinadas profundidades. Con el tiempo, estos materiales "sólidos" y calientes se deforman y llegan a comportarse como un fluido pastoso. De vez en cuando, en diversos sitios, se funden los materiales que están a menos de 200 km de la superficie. Dicha fusión da origen a los magmas que, más ligeros, se abrirán camino hacia la superficie y engendrarán los volcanes. Este mecanismo no se produce en cualquier parte, de modo que constituye un indicador importante para entender los movimientos dentro de la Tierra. El nombre del autraliano Ted Ringwood quedará para siempre ligado a las investigaciones de alta presión, a la explicación de los cambios de fase y al nacimiento de los líquidos de magma. Así fue como la antigua geofísica se transformó poco a poco, de estática en dinámica. Empezó basándose en la mecánica de sólidos, y luego abrirá sus puertas a la mecánica de fluidos.

La dinámica de fluidos y la física de materiales permiten asimismo abordar otro problema hasta entonces cuantificado pero poco comprobado: el origen del campo magnético terrestre, la causa de la desviación de la aguja imantada de la brújula. Desde Gauss se sabía que su origen "tenía que ver" con el centro de la Tierra. Se descubrió a partir de entonces que se trataba del núcleo externo, constituido por hierro líquido, el cual, al agitarse, creaba un campo magnético, y que a través de los tiempos geológicos había cambiado de sentido varias veces, el Polo Sur se volvía el Norte y viceversa. ¿De qué manera estos movimientos de hierro líquido turbulento llegaban a crear un campo magnético simple, como el de las barras imantadas? Gracias a mi colega Jean-Louis Le Mouël, quien supo vincular las observaciones sobre la variación temporal y espacial del campo magnético y la teoría relativa a su origen, se acercaron finalmente teóricos y observadores. A partir de ahí, desde hace diez años, se ha progresado a pasos agigantados y empezamos a comprender cómo convecciona el núcleo líquido. Ello se debe en gran medida al trabajo del equipo francés en torno a Le Mouël y del equipo inglés de Dave Gubbins.

Mediante esta física del interior de la Tierra, que ha seguido en pleno auge, es posible abordar el problema del origen de todos los fenómenos causados por estos movimientos internos, desde el origen del campo magnético hasta el funcionamiento de los volcanes o el desencadenamiento de los temblores de tierra y el desplazamiento de las placas.

PLANETOLOGÍA

Mientras apenas —y con trabajos— surgía la tectónica de placas a fines de los años sesenta, otro suceso revolucionaba las ciencias de la Tierra: la exploración espacial y lo que fue su símbolo por antonomasia, la exploración de la Luna.

El fin del siglo XV estuvo marcado por el descubrimiento de América; el del siglo XX lo estará por la exploración espacial. La imagen de Neil Armstrong, primer hombre en pisar el suelo lunar, es quizás equiparable para los siglos futuros a la de Cristóbal Colón al avistar tierra en la proa de la *Santa María.*

Al salir de su planeta, el hombre se sitúa en el Universo y al mismo tiempo toma conciencia de que la Tierra es un planeta con particularidades específicas entre los demás astros que se le parecen.

Ayer, el estudio de los planetas pertenecía al dominio de los astrónomos, un mundo mecánico cuyas leyes habían sido definidas por Kepler y después Newton, las cuales correspondían a la relojería planetaria.

Con la exploración lunar y después con las misiones fotográficas, el radar y la geofísica, aplicados a Marte, Mercurio, Venus, los satélites de Júpiter, Saturno y Neptuno, surge una nueva planetología, esta vez comparativa, en la que se puede incluir a la Tierra.

Armstrong llevó a la Luna el martillo del geólogo y recogió ahí rocas que se estudiaron en el laboratorio. Al mismo tiempo, la geología se volvía planetaria, la Tierra "se situaba" a partir de entonces entre sus semejantes. Destacan nítidamente características generales de los planetas y la especificidad única de la Tierra. Sólo ella entre sus planetas hermanos reúne las condiciones para alojar vida. En Mercurio o en Venus, muy cercanos al Sol, sin agua y con una temperatura muy alta en su superficie, la vida sería imposible; más alejados del Sol, nos encontraríamos en una situación de glaciación permanente.

Se descubre de esta manera que el vulcanismo —el proceso por el cual un magma proveniente de las profundidades de un planeta horada su superficie, se derama y se solidifica al enfriarse— es el fenómeno geológico más conocido del Sistema Solar, y que existe o ha existido en prácticamente todos los planetas y en los satélites de los planetas gigantes.[26]

[26] Recordemos la posición de los planetas del Sistema Solar. A medida que se aleja uno del Sol, se encuentran en orden Mercurio, Venus, Tierra, Marte; son planetas internos llamados telúricos, que están constituidos por un núcleo rocoso y rodeados de escasa atmósfera. Más alejados, se encuentran los planetas gigantes: Júpiter, Saturno, Neptuno, Urano, Plutón. Los planetas

Se confirma la presencia general de atmósfera gaseosa, pero su importancia varía mucho: en Marte es tenue, en Venus abundante, y predomina de forma absoluta en los planetas gigantes. Se creía que la tectónica de placas era una particularidad terrestre, pero en Venus se detecta en forma primitiva. Se pensaba que los anillos eran atributo de Saturno, pero se descubre que existen alrededor de todos los planetas gigantes, Júpiter, Neptuno, Urano. Se creía que la distancia entre los planetas alrededor del Sol era resultado del "azar", a pesar de la ley establecida por Bode; no obstante, la exploración planetaria pone de manifiesto que dicha ley se aplica asimismo a la distancia de los satélites en torno a Júpiter, a Saturno, a Neptuno. Hay que rendirse ante las evidencias: la ley de Bode es universal[27] (aun cuando todavía no se comprenda cabalmente).

Las sondas interplanetarias han permitido asimismo determinar la composición química de diferentes planetas, la cual parece obedecer una lógica dirigida por un parámetro cardinal: su distancia respecto al Sol. Entre más alejado del Sol se encuentra un planeta, más abundantes son sus componentes volátiles. Esa lógica avala la probable existencia del "Sol niño" (T. Tauri), muy caliente y potente, cuyos vientos de partículas empujaron al exterior la masa gaseosa que rodeaba a los planetas internos. Se refuerza así el carácter excepcional y "singular" de la Tierra, único planeta a la vez "templado" y acuoso, y por lo tanto propicio para la vida.

De este modo se elaboró una nueva planetología comparada, que combina la física y la química para explicar la diversidad planetaria y que sustituye a la mecánica celeste inerte de la astronomía tradicional.

Una de las contribuciones más fascinantes de la exploración espacial reside en la clave que nos proporcionó para comprender cómo se formaron los planetas y, en consecuencia, la Tierra. El punto de partida fue el descubrimiento en todos los planetas y en sus satélites de numerosos cráteres ocasionados por impactos, testimonio de que los astros fueron en un tiempo el escenario de violentas caídas de objetos provenientes del espacio. Al cuantificar esta información, lo que se llevó a cabo durante la exploración lunar, se logró comprender la formación de la Tierra.

internos tienen pocos satélites: la Tierra tiene la Luna, Marte cuenta con dos, Phobos y Deimos; los satélites de Júpiter son 16; los principales se llaman Ío, Europa, Ganímedes y Calisto. Los de Saturno suman 20, siendo los más conocidos Mimas, Encelados, Tetis, Rhea y Titán. Los de Urano son 15; los de Neptuno, 3.

[27] La ley de Bode establece que cada planeta se encuentra dos veces más alejado del Sol que su planeta interior más cercano. La única excepción es la ausencia de planeta entre Marte y Júpiter. En realidad, en ese lugar se descubrió el cinturón de asteroides, formado por miles de bloques rocosos, de los cuales el mayor, Ceres, tiene 1 000 km de diámetro.

El origen de la Tierra

Durante mucho tiempo se pensó que los planetas eran resultado del colapso gravitacional violento[28] y rápido de una nube de polvo cósmico interestelar. Sin embargo, se descubrió más tarde que al menos cuatro planetas telúricos se formaron paso a paso, lentamente, por la acumulación de polvo para formar gránulos; después gránulos para formar canicas, después pelotas, balones, bloques..., todos ellos objetos rocosos agrupados bajo la denominación de planetesimales. Mediante la aglomeración de esos grandes bloques, se acabaron de formar grandes esferas que finalmente fueron llamadas planetas.

Este proceso es tan lento que los meteoritos que caen todavía en la Tierra hoy en día, como el que formó el cráter-meteoro de Arizona, constituyen el final de este proceso de aglomeración. En este contexto, la Luna desempeña el papel de registradora insustituible. Puesto que la actividad de ésta cesó hace aproximadamente 3.2 mil millones de años, y puesto que los suelos preservados hasta nuestros días datan de 4.4 a 3.2 mil millones de años, el recuento de los cráteres en cada uno de estos suelos ha permitido registrar ese proceso de aglomeración planetaria. Se descubrió que fue un proceso muy rápido, hace cerca de 4.5 mil millones de años, y que en seguida decreció aceleradamente. Se ha estimado que para construir un planeta como la Tierra se requirieron 100 millones de años; para "producir" a Marte, bastaron de 30 a 40 millones de años. También se descubrió que en ocasiones podían producirse algunos fracasos. Así, entre Marte y Júpiter, la aglomeración de planetesimales se empezó a dar y después se revirtió: en lugar de acumularse, se fragmentaron al encontrarse, al chocar entre sí. El efecto "bola de nieve" desembocó en destrucción en lugar de construcción. En lugar del décimo planeta predicho por la ley de Bode, existen millones de fragmentos de rocas (la más grande presenta un radio de 100 km, las más pequeñas son gravilla), que giran alrededor del Sol, y constituyen lo que se llama el cinturón de asteroides. Pero estos impactos desestructurantes no se restringen al "cinturón de asteroides".

Cuando la Tierra estaba en formación y era un poco mayor que Marte, el impacto de un objeto un poco más grande que los otros le arrancó millones de pedazos rocosos que engendraron a la Luna, cuando éstos volvieron a aglomerarse en su órbita. A ello se debe que la Luna sea más antigua que la Tierra, aun cuando sea su hija.

[28] Cuando una nube de gas o de polvo alcanza una masa y una densidad suficientes, las fuerzas gravitacionales que ejercen los gránulos provocan una aglomeración muy rápida de la nube. Es lo que se llama el colapso gravitacional, estudiado por el astrónomo inglés Jeans.

Gracias a los avances de la radiología planetesimal se han podido reubicar con precisión todos estos sucesos en el calendario. Los primeros planetesimales se formaron hace 4 567 millones de años, y la Luna hace 4 500 millones. La Tierra terminó de formarse hace 4 400 millones de años, es decir, 150 millones de años después del nacimiento de los primeros "embriones rocosos".

Geología isotópica

Con la determinación de la antigüedad de las rocas por métodos radiactivos se introdujo la cuantificación en la geología. La generalización de este recurso en la física nuclear permitirá el surgimiento de una nueva disciplina: la geología (o geoquímica) isotópica.

En lugar de interesarse por la composición isotópica de una roca o mineral con objeto de determinar su antigüedad, se examinará la composición isotópica de un conjunto de rocas (o de las muestras de agua o de gas).[29] Se trabaja, así, con poblaciones de composiciones isotópicas e incluso de composiciones múltiples, pues se considera ya no un elemento, una radioactividad, sino varios a la vez. Puesto que los elementos químicos estroncio, plomo, neodimio, argón, xenón, osmio o torio tienen también una historia geológica, sus composiciones isotópicas van a relatar las peripecias de esas historias; constituyen memorias geológicas.

Los isótopos radioactivos de periodo corto muestran huellas de fenómenos biológicos y con ese fin se les utiliza en bioquímica y en medicina. De igual forma, los isótopos de elementos radiogénicos (es decir, los producidos por una radioactividad de periodo largo) tienen marcas de fenómenos geológicos, pero pasados. Constituyen una especie de "fósiles químicos".

Estos isótopos permitirán estudiar, es decir, reconstituir, la génesis, la evolución y la dinámica de los sistemas geológicos grandes o pequeños: los continentes, la atmósfera, el volcán o el río.

La atmósfera, el océano y el continente están compuestos de elementos químicos que el manto primitivo expulsó hacia la superficie. La atmósfera terrestre se formó muy rápido, en 50 millones de años, en el momento en que la Tierra acababa de aglomerarse y cuando el núcleo terrestre de hierro se aislaba en el centro. Los continentes se formaron de manera progresiva, más tarde, en un lapso de entre 4 y 2

[29] Ya lo señalamos: cuando dos átomos tienen el mismo número de electrones y en consecuencia el mismo número de protones, pero difieren en el número de neutrones, se dice que son isótopos. Con ayuda del espectrómetro de masa, es posible medir la proporción de isótopos de cada elemento natural. Esto se conoce como su composición isotópica.

millones de años. Gracias al marcador isotópico de las masas de agua de los océanos, se sabe que la gestación de los océanos duró 2 000 años, que fue un fenómeno global, mundial, y que las aguas que en el año 1000 estaban en la superficie del Atlántico y a las que se enfrentaban los vikingos al descubrir América, se encuentran en la actualidad sepultadas a 4 000 metros de profundidad en medio del Pacífico, en alguna parte entre Hawai y la costa de Estados Unidos. Se han determinado los trayectos de esta lenta circulación oceánica, cuyo movimiento no es perceptible. Asimismo, se ha demostrado que los basaltos arrojados por el vulcanismo no son todos idénticos. Al vulcanismo de las dorsales oceánicas se añade un vulcanismo llamado de puntos calientes de origen profundo, como el de Hawai o el de las Azores. Los isótopos muestran que sus lugares de origen en el manto son diferentes: el manto, a pesar de estar en movimiento continuo, se encuentra muy lejos de ser homogéneo; está segmentado en dos capas, cuyos movimientos se superponen. Océano y manto, dos depósitos terrestres cuya historia y movimientos fue posible entender gracias a los marcadores isotópicos.

Para estudiar los fenómenos de superficie se usarán los isótopos de los elementos ligeros: los del oxígeno o del carbono. Al cuantificarse éstos en las conchas o en hielos antiguos, se logra decodificar las vicisitudes de la historia de la superficie terrestre, las variaciones climáticas o las de las condiciones de desarrollo de los seres vivos, etcétera.

Los laboratorios de las geociencias se parecerán cada vez más a los laboratorios de física, donde, con la ayuda de máquinas poderosas, se "interroga" lo infinitamente pequeño para conocer la historia de la Tierra: la ciencia a la conquista del pasado.

La geología isotópica se impone como un enfoque transversal en relación con ciertas disciplinas tradicionales. Con los mismos métodos, las mismas técnicas, los mismos razonamientos, la geología permite estudiar rocas, estratos, meteoritos, rocas lunares, al igual que los fósiles y su medio ambiente, el océano, los hielos, la atmósfera. El geoquímico posee ahora una secuencia de fósiles isotópicos que contienen oxígeno, carbono, estroncio, plomo, uranio, neodimio, por citar sólo los principales elementos, cuya utilización y combinación permitirán descubrir la historia química de la Tierra, sin límite de tiempo ni de tipo de materiales.

La geología isotópica constituye en sí misma un nuevo paradigma que agrupa los variados aspectos de las ciencias de la Tierra.

30 Las variaciones isotópicas de los elementos ligeros, oxígeno, carbono o nitrógeno, no se deben a la radioactividad, sino a los fenómenos físicoquímicos sensibles a la temperatura y a los mecanismos biológicos (fotosíntesis, respiración).

Climatología

El enfoque isotópico renueva en su totalidad el estudio de los fenómenos de la superficie de la Tierra que tienen por escenario la interfase entre la Tierra sólida, la acuosa y la gaseosa; dicho de otra manera, que suceden por la conjunción Tierra/océano/atmósfera.

La medición de las relaciones isotópicas del oxígeno en las conchas fósiles y en los hielos polares posibilita el cálculo de la temperatura media del planeta que prevalecía en el momento en que estos "objetos" geológicos se formaron. El hecho de que los fósiles se encuentren en los sedimentos apilados unos sobre otros; que los hielos se hayan depositado también uno tras otro en capas anuales y que sea posible obtener una cronología precisa de esa estratificación permite reconstituir el calendario climático del pasado.

Se ha comprobado que durante el último millón de años las temperaturas terrestres alternaron periodos glaciales (hace 20 000 años, los glaciares llegaban hasta Lyon; el inlandsis polar llegaba hasta los grandes lagos canadienses) con periodos interglaciales más benignos, como el que vivimos en la actualidad.

Estos estudios van a proporcionar otra escala de tiempo a la metereología. Las ciencias de la atmósfera y del océano, limitadas en su ambición predictiva[31] por razones que abordaremos en el capítulo siguiente, descubren otra escala de tiempo a partir del estudio del clima. Al mismo tiempo, se beneficiarán de la invaluable aportación de datos que les proporciona la historia: los periodos de larga duración.

Con ayuda de la moda ecológica, el estudio del clima se convertirá en el nuevo paradigma de las ciencias de la Tierra, en torno al cual se organizarán las ciencias de la superficie terrestre.

Es fácil comprender por qué. El motor de la actividad geológica de la superficie de la Tierra, la fuente única de energía, es el Sol. Los rayos solares aportan energía radiativa y controlan así el ciclo del agua (la evaporación, el desplazamiento, las lluvias que erosionan los continentes), los movimientos de los vientos atmosféricos, los movimientos rápidos y lentos de los océanos, la síntesis clorofílica de las plantas. La manera en que los gases de la atmósfera —principalmente los que son escasos en cantidad, como el agua, el gas carbónico y el ozono, absorben estos rayos (directos o reflejados)— determina en gran medida la geografía climática.

A esto se añade el hecho de que los movimientos de rotación de la

[31] Los términos no lineales de las ecuaciones de la mecánica de fluidos impiden toda predicción a largo plazo.

Tierra determinan las variaciones de iluminación solar; que las erupciones volcánicas pueden oscurecer el cielo; que la circulación oceánica es el gran regulador térmico de la superficie; y que todos estos factores interactúan recíprocamente. ¡Vaya complejidad!

Puesto que es posible estudiar el clima en escalas de tiempo variables —histórica, prehistórica, geológica—, se trata de un fenómeno cuya comprensión puede brindarnos grandes enseñanzas sobre los mecanismos que regulan el funcionamiento de la superficie terrestre. Con esta nueva climatología donde el presente se combina con la historia, se abre una nueva vertiente de estudios muy prometedores.

Geocibernética

La Tierra se presenta así como un enorme sistema cibernético que cuenta con una serie de ciclos interconectados: el ciclo de la tectónica de placas, cuyo trayecto más interesante es el que opera dentro del manto; el ciclo del agua, que la lleva a los continentes, donde, después de desempeñar su papel de agente erosionador, regresa al océano; el ciclo oceánico, por medio del cual el agua salada y fría del sur de Groelandia se hunde en las profundidades y se encuentra mil años después en el Pacífico, donde se remonta a lo largo de las costas de Perú y de México y regresa lentamente al Atlántico; el ciclo geológico continental, con la famosa sucesión erosión/sedimentación/metamorfismo.

Estos ciclos presentan duraciones muy diferentes: el de la tectónica de placas se extiende por mil millones de años; el ciclo geológico, 500 millones; el ciclo oceánico, mil años; el ciclo del agua, tres semanas. En cada caso es posible ahora comprobar la historia gracias a los archivos estratificados que se llaman rocas sedimentarias, que guardan la memoria de los continentes; gracias también a los sedimentos blandos de los fondos oceánicos y a las capas anuales de corales que constituyen la memoria de los océanos, y gracias a las capas de hielo de los *islansis,* que corresponden a las de la atmósfera.

El estudio del sistema Tierra resulta especialmente original, pues constituye a la vez un estudio actual e histórico: se estudia el presente para entender el pasado, se estudia el pasado para prever el porvenir.

Ecología

A partir de ahora, nos preocupamos del futuro del sistema Tierra y de la influencia que ejerce sobre ella un "nuevo" factor: el hombre.

La comunidad científica reflexiona sobre las cuestiones de protección de nuestro medio ambiente. El hombre pone en peligro los "equilibrios" naturales del planeta; produce más desperdicios que la naturaleza, contamina la atmósfera mediante el plomo añadido a la gasolina o con las lluvias ácidas. Desestabiliza el equilibrio meteorológico y climático con el aumento descontrolado de las cantidades de gas carbónico en la mesosfera. Amenaza la "capa de ozono" de la mesosfera, que nos protege de los rayos ultravioletas. Destruye de manera abusiva ciertas especies de seres vivos y modifica el curso de la evolución.[32] Por último, se reproduce en forma muy rápida y anárquica, lo que provoca desequilibrios demográficos peligrosos.

Esta nueva señal refuerza el carácter de unidad y globalidad de las ciencias de la Tierra, pero las orienta en dos nuevas direcciones.

La primera es la integración dentro de estas ciencias de una disciplina biológica hasta hace poco soslayada: la ecología.

El estudio de las sociedades de organismos vivos y sus relaciones con el medio ambiente proviene de la biología. En este nivel se ubica el determinismo de la selección natural, clave del proceso de evolución. Con todo, este estudio tiene consecuencias importantes para comprender la evolución de los ciclos químicos de la Tierra, se trate del carbono o del oxígeno. De este modo, hace 2 mil millones de años la aparición repentina de una intensa actividad fotosintética[33] hizo pasar súbitamente las cantidades de oxígeno de la atmósfera de 0 a 15%, lo que hizo posible el fenómeno de la respiración. La formación de conchas de carbonato de calcio permite almacenar el gas carbónico suelto en las calcáreas,[34] etc. Algunos científicos llegan incluso más lejos: Lovelock presentó la hipótesis de que la biosfera en su conjunto se encargaba de regular la temperatura externa del globo terráqueo, la cual, es cierto, ha permanecido cercana a los 25°C desde hace al menos 3 mil millones de años. Se trata de la teoría conocida con el nombre de "Gaia".

Sea como fuere, ahora estamos obligados a tomar en cuenta lo que empieza a conocerse con el nombre de biogeoquímica, la influencia biológica en los cíclos geoquímicos.

La segunda reorientación, incluso más innovadora, consiste en soli-

[32] Claude Allègre, *Écologie des villes, Écologie des champs*, París, Fayard, 1993.

[33] La fotosíntesis es el mecanismo bioquímico mediante el cual las plantas verdes, con ayuda de la clorofila, utilizan los rayos luminosos para reducir el gas carbónico, CO_2, y transformarlo en materia viva. Los mecanismos exactos de este proceso fueron entendidos cabalmente después de la segunda Guerra Mundial, gracias al trabajo de Calvin y su equipo.

[34] Si se "destruyeran" químicamente todas las rocas calcáreas de la corteza terrestre, nos sumergiríamos en una atmósfera formada en un 90% por gas carbónico. ¡La presión a nivel del suelo sería de 80 atmósferas, y la temperatura, de 200 a 300 grados centígrados!

citar a las ciencias de la Tierra predicciones sobre el porvenir de nuestro planeta, cuando hasta hoy se dedicaban exclusivamente al pasado y al presente. Apacibles después de los encendidos debates que surgieron durante su fundación, las ciencias de la Tierra se ven apremiadas para concebir y elaborar el nuevo "Contrato natural" de Michel Serres.

Una nueva ciencia de la Tierra hace su aparición; interesada en el pasado de la Tierra, procura asimismo comprender su presente y prever su futuro. Tras describir los fenómenos naturales y la lógica que siguen, trata de analizarlos en términos físicos: física de movimientos telúricos, física de fluidos naturales (del núcleo a la atmósfera alta), física del magnetismo, física de los medios granulares, etcétera.

Sólo que ahora ya contamos con medios nuevos y poderosos para estudiar el sistema Tierra: los satélites, para aplicar a las técnicas de observación la globalidad que domina todo en la actualidad; los estudios teóricos de los sistemas, basados en el enfoque nuevo de los fenómenos no lineales y de los inestables; los medios para realizar una verdadera experimentación numérica gracias a la computadora; los análisis químicos e isotópicos, cuya precisión y velocidad permiten en la actualidad analizar casi todo.

Más que nunca, se considera hoy a la Tierra un sistema único y global. Nunca antes las ciencias de la Tierra han conocido esta unidad, que difícilmente habrán ya de perder. ¿Pero hasta dónde llega esta unidad? ¿Las inversiones del campo magnético son responsables de modificaciones y, en consecuencia, de evoluciones climáticas, es decir, biológicas, por haber desencadenado erupciones volcánicas? Las respuestas que se den a este tipo de preguntas establecerán los límites de la globalidad del sistema Tierra.

X. EL ORDEN DEL CAOS

ORDEN, DESORDEN, CAOS, equilibrio, inestabilidad, desequilibrio, son algunos de los términos utilizados desde hace mucho tiempo para describir los estados de un sistema, ya sea material, de los organismos vivos o humano. Desde la Antigüedad, en particular desde Lucrecio, la ciencia ha investigado las relaciones que existen entre estos estados. La búsqueda requería que se les definiera con precisión. Con el desarrollo de la ciencia, en especial a partir del siglo XVIII, el interés se trasladó a los conceptos de equilibrio y orden. No sólo se pensaba que los estados estables eran los más armoniosos, sino que todos los sistemas naturales tendían hacia ellos. Los conceptos de equilibrio y de estabilidad se vieron rápidamente asociados con el orden, la simetría y, en consecuencia, la geometría y la armonía. Además, y no es uno de sus méritos menores, los sistemas en equilibrio podían estudiarse de manera eficaz con formalismos sencillos. Este estudio permitió a la física tradicional obtener grandes logros, cuyos nombres son termodinámica, cristalografía, física de sólidos y, más próximas a nosotros, la cromodinámica cuántica y la física de partículas, ciencias totalmente basadas en el concepto de simetría de la naturaleza.

Se sabía que también existían en la naturaleza sistemas desordenados, fuera de equilibrio, los cuales, sin embargo, parecían no obedecer ninguna ley y ser, por tanto, intrínsecamente inaccesibles a la ciencia. A lo más, se investigaban aquellos que se encontraban cerca del equilibrio y que, en consecuencia, parecían abordables.

Claro está que tal primacía del equilibrio y del orden no estuvo exenta de consecuencias para el pensamiento occidental. En el curso de veinte años, sin embargo, toda nuestra visión del mundo habría de cambiar y trastocarse. Se creía que la organización de los cristales simétricos era el símbolo de la organización de la naturaleza; se descubre que sólo el desequilibrio, el desorden, son creadores de estructuras novedosas. Se pensaba que la regla simple, intuitiva, de acuerdo con la cual los efectos son proporcionales a las causas, era la más general en el Universo; se comprueba que sólo es un caso particular. Se sostenía que la geometría clásica, con sus rectas, sus ángulos y sus curvas armoniosas, permitía describir de modo eficaz la forma de los objetos naturales; pero se comprueba su ineficacia para describir la naturaleza. Algo mucho más sorprendente, los sistemas desordenados, com-

plejos, fuera de equilibrio, pueden describirse con métodos científicos, eficaces y rigurosos. Con la ventaja incluso de que obedecen leyes, siguen cierta organización, en suma: ¡existe cierto orden en el aparente desorden!

Para traducir los avances del nuevo campo de la ciencia, hace su aparición un vocabulario inédito: bifurcaciones, fractales, leyes de escala, caos, actractores extraños, intermitencias... Damos vuelta a una página en nuestra búsqueda por comprender el mundo, página gloriosa, pero que ha llegado al límite. Ahora, entramos a la era de la exploración de lo complejo; lo hacemos sin temor, pues no estamos desarmados ni somos ignorantes. A continuación hablaremos de esta extraordinaria aventura, tratando de respetar su carácter multifacético y diverso.

Química del desequilibrio

Las primeras exploraciones en estas *terrae incognitae* del campo de los desequilibrios fueron realizadas a finales de los años sesenta por el grupo de químicos de Bruselas que trabajaba con Ilya Prigogine. Siendo especialistas en termodinámica química y usuarios de los conceptos creados por Carnot, Clausius, Joule y otros científicos, los investigadores de Bruselas se dieron cuenta de los límites de esa disciplina. En efecto, los enfoques tradicionales de la termodinámica se insertan en el marco de los sistemas cerrados y en equilibrio.[1] Ahora bien, en la naturaleza, muchos sistemas que intercambian materia con el exterior no se encuentran en estado de equilibrio, en el sentido termodinámico del término. Entre ellos, los más asombrosos son los organismos vivos: ¡esperan la muerte para obedecer a la termodinámica del equilibrio! Sin embargo, también en el mundo inerte existen muchos sistemas fuera de equilibrio, como los que reciben calor o materia de manera no uniforme, o los que reaccionan con velocidades variables: los casos más evidentes son las reacciones químicas que se disparan y desembocan en explosiones.

El estudio de la termodinámica de los procesos fuera de equilibrio constituye desde hace tiempo una especialidad flamenca y Prigogine (bruselense por adopción) ocupa un lugar en esa vieja tradición; sin embargo, le añade un rasgo completamente nuevo, al liberarse de la regla de proporcionalidad entre causas y efectos. A esta nueva libertad se le llama, en términos técnicos, la no linealidad. Prigogine trabaja entonces con los sistemas fuera de equilibrio, abiertos y no lineales. Se interesa muy particularmente en dos tipos de problemas.

[1] Véase I. Prigogine e I. Stengers, *La Nouvelle Alliance*, París, Gallimard, 1979.

El primer tipo, puramente químico, se refiere a las reacciones que generan oscilaciones, que de manera alternada provocan o revierten una reacción. En los años cincuenta, los rusos Beloussov y Jabotinski descubrieron mediante la experimentación este tipo de reacciones. Existen también reacciones que generan estructuras alternantes en bandas. El grupo de Bruselas descubre que para explicar dichas observaciones, es obligatorio recurrir al desequilibrio y a fenómenos no lineales.

El segundo tipo se refiere a los fenómenos biológicos. Como por esa época empezaba a apuntalarse la biología molecular, el grupo de Bruselas intenta modelar de manera cuantitativa los procesos de replicación celular del ADN y de la regulación celular. Nuevamente, los investigadores se apoyarán en la no linealidad y sus esfuerzos convertirán a la química en una disciplina de avanzada. Prigogine difunde en muchas partes del mundo la idea de que el desequilibrio es la fuente de creación de estructuras. Sin embargo, la termodinámica es una disciplina difícil. El grupo de Bruselas, fascinado "a la francesa" por la formalización, presenta sus resultados de modo muy complicado para los no especialistas. La biología molecular se desarrolla sin detenerse en ello y son raros los químicos experimentales que tratan de reproducir en el laboratorio los fenómenos propuestos por los cálculos de Prigogine y sus colegas.

Grupo de renormalización

La segunda familia de trabajos que condujeron al estudio de los fenómenos de desorden proviene de la física básica. En los años setenta, Ken Wilson, un joven profesor de física teórica de la Universidad de Cornell, en Estados Unidos, intenta descifrar una clase de fenómenos importantes llamados en física "transiciones de fase".[2] Cuando calentamos agua, ésta se transforma en vapor a los 100°C. Este cambio de estado se produce bruscamente. En unas cuantas décimas de grado, el estado líquido en el que las moléculas están aglomeradas de manera coherente se desorganiza para dar paso al estado de vapor, en el cual las moléculas están libres individualmente. ¿A qué se debe el cambio tan súbito de comportamiento? ¿Por qué la transición no se lleva a cabo gradualmente? Estas preguntas se las han planteado los físicos desde Van der Waals.

Otra transición de fase clásica en física se refiere a los imanes. Esas sustancias que atraen de manera espontánea a las limaduras de hierro

[2] *Cf.* K. Wilson, "Les phénomènes physiques et les échelles de longueur", en *Le Chaos*, Bibliothèque pour la science.

pierden esa propiedad súbitamente cuando traspasan el llamado punto de Curie, es decir, cuando se les calienta por encima de cierta temperatura (700°C, en el caso del hierro); sin embargo, cuando se les enfría, los imanes recuperan su propiedad "mágica" de la misma manera repentina en que la perdieron. Como en el caso de la ebullición del agua, se trata también de una transición brusca entre un estado ordenado (imantado) y un estado desordenado (desimantado). Constituye la prueba de que la materia se organiza y se desorganiza siguiendo leyes en extremo precisas, pero que cambian de manera muy brusca; en realidad nada permite preverlas pocos grados antes de la transición. ¿Cómo explicar este fenómeno?

Ken Wilson aborda el problema concentrándose en la manera en que se organiza la materia. ¿Cómo es posible que todos los átomos de una sustancia se comporten de manera idéntica en un momento determinado? Por ejemplo, cuando se encuentran libres, ¿por qué se orientan de manera ordenada (o a la inversa)? Él presupone que la organización de la materia está jerarquizada: cada átomo sólo tiene relación con sus vecinos cercanos. Tal sistema de interacciones locales forma un "dominio" que interactúa a su vez con los "dominios" vecinos, los cuales forman a su vez dominios de tercer orden, etc. Wilson se comporta como un sociólogo a quien le interesaría estudiar el comportamiento de un poblado, para lo cual divide a éste en viviendas, las viviendas en calles, las calles en manzanas, las manzanas en secciones, las secciones en zonas, etc. En resumen, jerarquiza la organización de la materia determinando la naturaleza de las interacciones que se presentan en cada nivel.

De esta manera, Wilson puede calcular el comportamiento del sistema utilizando en cada etapa los resultados del nivel inferior. Este enfoque le permite establecer una "longitud de organización", una "distancia de coherencia". ¿Cuál es la distancia a la que el comportamiento de un átomo específico influye en el comportamiento de otros átomos? Si el sistema se encuentra totalmente desordenado, la distancia es muy corta, cada átomo está libre o casi libre. Cuando el sistema se organiza, el átomo influye en sus vecinos cada vez mejor y en mayor medida. Si los dominios de segundo orden comienzan a interactuar, el átomo extiende su "zona de influencia" y así de manera sucesiva. La distancia de organización resulta entonces la distancia que los separa. Una vez que demostró que dicha distancia de organización gobierna las propiedades físicas más importantes —la densidad o la imantación, en los ejemplos elegidos—. Wilson estudia la manera en que esta propiedad varía —la temperatura, en los ejemplos escogidos—, el parámetro cardinal del sistema.

Wilson demuestra que cuando se modifica ese parámetro, la distancia de organización varía con él, pero de manera muy especial. En un gran intervalo, la distancia varía muy poco, permanece muy reducida: un átomo influye sólo en sus vecinos cercanos. Después, cuando alcanza cierto valor, la distancia de influencia aumenta muy rápido y llega a ser infinita. Ese valor particular corresponde precisamente al valor crítico, a la transición de fase. Este cálculo reproduce cuantitativamente la brusquedad del fenómeno de transición de fase que observan los investigadores. Así, se calculan las leyes de variación de las propiedades físicas de estas sustancias (densidad, imantación, etc.) cuando se acercan al punto crítico. Todas estas leyes tienen la misma forma: la propiedad es proporcional a la diferencia de temperatura con respecto a la temperatura crítica, elevada a cierta potencia; el valor del exponente potencial se llama exponente crítico (ya que describe la ley en el entorno del punto crítico). Gracias al método de Wilson, es posible calcular tales exponentes con gran precisión. Los investigadores siguen trabajando en estos problemas; en especial, Michael Fischer, Leo Kadanoff y Édouard Brezin han comprobado, para su sorpresa, que diversas propiedades físicas obedecen todas la misma ley y, más aún, que sistemas de naturaleza totalmente diferente —por ejemplo, la evaporación del agua en una cacerola, un alambre de fierro y su desimantación— obedecen por igual a la misma ley, con el mismo exponente crítico.

De manera que, más allá de la naturaleza de los sistemas, más allá de los fenómenos estudiados, existen constantes universales, del mismo modo en que siempre se encuentra π cuando se mide la relación entre el perímetro de un círculo y su diámetro, sin importar la dimensión del círculo.

La naturaleza de estos parámetros universales había permanecido en el misterio por mucho tiempo. Después de numerosas investigaciones, se llegó finalmente a la conclusión de que el valor de estos exponentes críticos no dependía más que de dos parámetros que describen el tipo de organización de la materia en estudio. Se trata, por una parte, del grado de libertad de cada átomo (o de cada molécula) y, por otra, de su simetría.

Más allá de las apariencias, se descubre así que en la organización de los sistemas físicos complejos existen leyes simples que vinculan los niveles de organización entre sí y que trascienden sus particularidades. Dichas leyes de transferencia de escalas conducen a comportamientos no lineales, mejor dicho, a cambios bruscos de comportamiento, en virtud de los cuales se logran "efectos enormes" al variar levemente las "causas"; se trata de un descubrimiento fundamental.

Durante mucho tiempo se creyó que todo comportamiento de la materia se encontraba regulado por las propiedades de los átomos (o de las moléculas), y que si se conocieran las propiedades cuánticas de una sustancia en su escala microscópica, el resto podría deducirse con facilidad, pues el todo constituye la suma de las partes. Esta visión reduccionista se parecía un poco a la de los pioneros de la biología molecular cuando afirmaban: "Lo que es válido para la bacteria es válido para el elefante"; dicho de otra manera, el conocimiento de las propiedades de la célula lleva al conocimiento de los organismos compuestos de muchas células. Se sabe actualmente que esta visión es interesante pero limitada y, a la postre, falsa. Como lo expresa en broma Ken Wilson: "¡No por conocer las propiedades cuánticas de la molécula de agua, seremos totalmente capaces de deducir las leyes que rigen la formación de olas en el mar!"

De hecho, entre el átomo y la materia en su estado macroscópico, la escala de organización varía considerablemente: va desde el entorno de los átomos, que se mide en diez mil millonésimas de metro, hasta, por ejemplo, las olas, que alcanzan cientos de metros.

Wilson nos demuestra que si se quieren explicar las propiedades del océano a partir de las de la molécula del agua, hay que hacerlo en etapas, pasando de un nivel de organización a otro. La transferencia directa es imposible: en cada nivel, en cada escala de longitud, existen leyes de organización que no son lineales, donde la simple multiplicación, la simple suma, no tienen ningún sentido.

No contento con darnos este mensaje general, Wilson nos proporciona el método práctico para realizar el ejercicio y nos advierte que el número de las reglas es limitado: Fue bien merecido el premio Nobel que recibió como recompensa de su trabajo.

Materia blanda

A partir de este enfoque, se presenció durante el mismo periodo un esfuerzo similar para el estudio de los sistemas físicos desorganizados, masivos, elásticos, espumosos, fibrosos o granulares: en suma, de los estados "no clásicos". En un principio, algunos físicos se sirvieron sin duda de este recurso para intentar rescatar a la física estadística de la disyuntiva en que se encontraba: estudiar los gases, es decir, el desorden total, o estudiar los sólidos, es decir, el orden perfecto. ¿Por qué no intentar comprender los estados más complejos de la materia, por ejemplo los líquidos, en los cuales los átomos no se encuentran ni libres ni sólidamente vinculados? ¿Y por qué no empezar con esos

líquidos especiales, llamados cristales líquidos? Al menos se podrían usar ciertas técnicas del estudio de los cristales, como los rayos x, la difracción de neutrones o la polarización de la luz. Se comprueba así que los cristales líquidos, en apariencia desordenados, obedecen leyes, principios, y que es posible calcular sus propiedades; en resumen, que en un medio desordenado es posible estudiar la física de la misma manera que en los medios ordenados constituidos por los cristales.

A partir de ahí, el movimiento científico se acelera. De los cristales líquidos se pasa a los líquidos en los cuales se remojan polímeros, esas moléculas largas, estiradas como cadenas que se tuercen, se pliegan y en ocasiones se enrollan. Ahí también se observa que estos medios complejos presentan comportamientos que obedecen leyes específicas. El nombre del estadunidense Flory sobresale en los primeros estudios sobre polímeros. Después, los investigadores se entusiasman y estudian medios incluso más extraños: los espumosos, constituidos por bolas de gas prisioneras en una tenue red de líquido; las arenas, constituidas por conjuntos de granos; los pegamentos, que permiten juntar dos objetos, etc. ¿Cómo se forma un montón de arena? ¿Por qué presenta esa forma? ¿Por qué se derrama si se le sobrecarga? ¿Cuál es el límite de esa sobrecarga?

En todos los casos, se llega a describir el comportamiento de estos medios. Aun cuando el método de Wilson sea de gran ayuda, en ocasiones se requiere desarrollar métodos originales y se comprueba que si bien los comportamientos de estos medios obedecen leyes, éstas no corresponden a las leyes simples a las que la física clásica nos tenía acostumbrados. También aquí las propiedades cambian de manera discontinua, brutal. Algunos polímeros de más y la solución, en apariencia homogénea, se gelifica; algunos granos de arena de más y el montón de arena se derrumba. Nos encontramos en un mundo en donde los efectos no son proporcionales a las causas. Se habla de "orden de corta distancia", de "distancia de correlación" o de "umbral de percolación", a partir del cual las propiedades de un medio granular o en red cambian radicalmente.[3] Se descubren las leyes generales

[3] Supongamos una red eléctrica constituida por una misma serie de cables puestos bajo tensión en dos puntos opuestos. Si cortamos una a una las conexiones de la red, llega el momento en el cual se interrumpe la corriente entre los dos puntos. Si la red está formada por numerosas conexiones, se comprueba que la proporción de ellas que hay que cortar para interrumpir la corriente eléctrica es casi constante, sin importar la forma de la red o el tipo de conexiones. Esta propiedad estadística define el umbral de percolación. Es una especie de umbral crítico. Por debajo de él, estamos en el estado de paso de corriente, por arriba de él, en el estado de interrupción del paso de corriente. Queda demostrado que, alrededor de este punto crítico, las propiedades obedecen leyes similares a las descubiertas por Wilson. Este ejemplo de red eléctrica puede extenderse a todas las redes conectadas: red de poros, red de cables de polímeros, etcétera.

de estos comportamientos: la existencia de puntos críticos, es decir, de umbrales a partir de los cuales las propiedades cambian bruscamente; la existencia de leyes de escala que permiten describir la materia en diferentes escalas de longitud con las mismas leyes, los mismos parámetros; la existencia de exponentes críticos, etcétera.

De esta manera, con métodos diferentes aplicados a objetos diferentes, el estudio de la "materia blanda", como la llama Pierre-Gilles De Gennes, llega al mismo tipo de conclusiones que los estudios de Wilson. Pero el estudio de la materia dúctil aporta por añadidura una cantidad extraordinaria de experimentos y observaciones novedosos a los cuales corresponderá una variedad de enfoques teóricos, también más diversificados.

Los sistemas complejos se organizan y se desorganizan siguiendo leyes; el desorden, por consiguiente, también obedece leyes. Se pasa del orden al desorden, es cierto, pero lo inverso también es posible. Lo que se creía particular al mundo de los seres vivos parece aplicarse de la misma manera a los sistemas físicos inanimados. Existe un orden oculto bajo el desorden aparente.

Esta física de la materia desordenada, de los estados "extraños" de la materia, se encontrará dominada por la personalidad fulgurante de Pierre-Gilles De Gennes, a la cabeza de los equipos de Orsay y posteriormente del Collège de France. Una vez más insistiremos en el hecho de que este campo se desarrolló de manera muy clásica, combinando experimentos simples pero ingeniosos,[4] observaciones y modelación simplificadora y predictiva.

Los fractales

El enfoque de Benoît Mandelbrot hacia sus objetos fractales es totalmente diferente. Egresado del Politécnico, Mandelbrot trabaja en la compañía IBM y trata de realizar la simulación de formas con la computadora. Observa que si se desea simular la costa, el perfil de una montaña, el trazo de un río o una nube, resulta difícil hacerlo con las formas de la geometría tradicional. Comprueba que las formas mencionadas están fracturadas, tienen ángulos fuertes, cambios de dirección bruscos y, sobre todo, que cuando se mira la forma de la costa, la cresta de una montaña o el contorno de una nube, las líneas zigzagueantes o en volutas torcidas que describen esto son las mismas, sin

[4] De Gennes acostumbra decir: "tres años de experimentos y seis meses de teoría". Estas teorías simples y evolutivas se parecen a los modelos desarrollados a todo lo largo del progreso de la biología molecular.

importar la escala en que se les observe. Vista desde un satélite, un avión, un helicóptero o a simple vista, la forma de una costa está recortada de la misma manera. La simple figura geométrica o el simple diseño no indican la escala de las longitudes. Todo sucede entonces como si estas estructuras recortadas estuviesen empacadas unas en otras: el agrandamiento de un recorte muestra que también está fragmentado, etc. Mandelbrot asigna a estas estructuras el calificativo de fractales, o "estructuras autosemejantes".

Los dibujos a diferentes escalas no son totalmente homotéticos, pero son análogos, semejantes, parecidos, cercanos. Estas formas no corresponden a las de la geometría tradicional: rectas, círculos o curvas simples. Constituyen perfiles en zigzag, con ángulos agudos, cambios bruscos de dirección, discontinuidades. Tan es así que resulta muy difícil medir la longitud del perímetro de estas formas, la cual depende del instrumento de medición que se emplee para ese cálculo.[5] Si se mide la longitud de la costa de Bretaña en un mapa a escala de 1 000 000 (el mapa de Francia en 1 m x 1 m), se obtiene una longitud L^1. Si se toma un mapa de 1 por 250 000 (es decir, agrandado cuatro veces), el perímetro L^2 será más grande que L^1: se habrán podido integrar detalles inadvertidos en la escala anterior, como los repliegues costeros, los zigzags de las fronteras. Tomemos el mapa de un estado (con escala 1 a 25 000); la medida de la longitud L^3 resultará aún mayor. Y lo mismo cuando midamos la longitud sobre el terreno con ayuda de un decámetro o de una cinta métrica. Para un mismo objeto, ¡entre más grande sea el detalle, más aumenta la longitud! La longitud de la costa bretona parece crecer de manera infinita en la medida en que crece la precisión de la medición. ¿La costa de Bretaña tendrá una longitud infinita? He aquí un resultado que nos negamos a creer, ya que no se aviene con el sentido común.

Este hecho matemático se debe a que el diseño de la forma es como un encaje o una tela de araña. No se trata de una verdadera superficie, pues presenta muchos "huecos", pero tampoco se trata de una línea. Una línea tiene una dimensión, una superficie es un objeto de dos dimensiones. Mandelbrot, obtiene en estas estructuras, una "dimensión" que no constituye un número entero (al contrario de la geometría común de Euler), sino un número fraccionario. De esta manera, la costa de Bretaña no tiene una dimensión uno como una curva, ni una dimensión dos como una superficie, sino una de 1.25. Así, un paisaje, una nube u otra costa podrán caracterizarse mediante dimensiones fractales.

[5] Esto lo demostró Richardson mucho antes de que Mandelbrot sacara provecho del resultado.

Podrán compararse estas dimensiones y, a partir de ello, deducir varias propiedades interesantes. Gracias a la regla de escala y a esta geometría fractal, se podrá simular en computadora un paisaje, una costa o una nube de modo verdaderamente realista, lo cual habría sido si no imposible, al menos difícil antes de Mandelbrot.

El procedimiento que se utiliza es el de un geómetra. Después de los griegos, de Euler o de los topólogos que abordaron el estudio y la clasificación de las formas por medio del examen de sus relaciones recíprocas, Mandelbrot reanuda la gran tradición de los fundadores de las matemáticas: comprender la geometría de la naturaleza, describir el universo de las formas naturales. Rescata y reúne toda una serie de trabajos sorprendentes que se habían olvidado, como los de Cantor, Hausdorff, Paul Lévy o Poincaré, desencadenando así una intensa actividad sobre este tema.

Mecánica de fluidos

El cuarto enfoque que contribuirá al nacimiento de la teoría del desorden surgió de la mecánica de los fluidos. La orgullosa mecánica, la de Laplace, Lagrange o Hamilton, se había dedicado a esos cuerpos "indefinidamente deformables" que constituyen los fluidos. Nombres como los de Bernoulli, Navier, Stokes, lord Rayleigh o Bénard habían dejado su huella imborrable en este campo. Se habían formulado ecuaciones rigurosas, globales y definitivas, llenas de símbolos complejos muy del gusto de los mecánicos. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos y los artificios de presentación, los comportamientos "interesantes" de la mecánica de fluidos seguían siendo inaccesibles.

Es verdad que se podía describir el flujo lento de un fluido viscoso en un tubo de dimensión media, pero cuando la velocidad se aceleraba, resultaba imposible comprenderla. En efecto, mientras el movimiento de un fluido es tranquilo, su comportamiento puede describirse como un conjunto de chorros paralelos. En cuanto aumenta su velocidad, el fluido toma formas de torbellino, dibuja complicadas volutas. Dicha turbulencia, comportamiento natural de los fluidos, cae fuera del campo de lo racional. Es decir, que cuando los comportamientos se vuelven interesantes, sinónimo de complicación, las respetables ecuaciones de la mecánica de fluidos se muestran súbitamente inútiles.

A partir de ahí, ¿cómo abordar de manera racional el problema de la turbulencia, es decir, la de los ríos, nubes, ciclos, o flujos de lavabos? En resumen, ¿cómo hacer una mecánica de los fluidos naturales?

METEOROLOGÍA

El primer intento encaminado a resolver esta aparente aporía lo constituye el trabajo de un meteorólogo del MIT, Edward Lorenz, quien como todo mundo, se hallaba perplejo ante la dificultad de predecir el clima a largo plazo; conocía bien las ecuaciones que regulan el comportamiento del fluido atmosférico. Lorenz aproxima la causa al efecto y concluye que la dificultad para predecir el futuro se debe a la existencia de variables no lineales en las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Para explorar la idea, decide realizar un experimento, aunque en meteorología, los únicos experimentos posibles se hacen mediante el cálculo. Escribe las ecuaciones simplificadas que describen los comportamientos de los principales parámetros meteorológicos: temperatura, velocidad vertical y velocidad horizontal de los vientos. Después opta por estudiar su comportamiento paso a paso, como lo hace un experimentador. Para el efecto, establece los valores de inicio de la temperatura y de la velocidad de los vientos; después calcula con ayuda de las ecuaciones los valores del "tiempo de mañana", después "de pasado mañana" y así sucesivamente. De este modo obtiene series temporales que muestran la variación de los parámetros meteorológicos día tras día, es decir, la predicción del tiempo que prevalecerá en el futuro. Hechos a mano, estos cálculos son largos y fastidiosos, por lo que Lorenz decide recurrir a las nuevas máquinas de cálculo que, en 1960, a menudo se descomponían y a las que ya se llamaba computadoras. Se trataba de un acto valeroso, pues en ese entonces la mayor parte de los científicos "teóricos" hacían a un lado e incluso despreciaban el empleo de esa "máquina". Pese al escepticismo que expresaban sus colegas del MIT, Lorenz no se detuvo.

Emprende así simulaciones numéricas destinadas a obtener curvas de evolución de los parámetros meteorológicos día tras día. Las ecuaciones que usa son simplificaciones de la realidad, caricaturas, dirían sus colegas: empieza con 12 ecuaciones, después va simplificando y acaba con tres ecuaciones.

Estas ecuaciones son diferenciales (describen la evolución de los parámetros meteorológicos a través del tiempo); están, como se dice, apareadas, es decir, las variaciones de un parámetro intervienen en las variaciones de los otros y viceversa, pero sobre todo, contienen términos que no obedecen a la relación "griega" de proporcionalidad entre causa y efecto.

El resultado lo sorprende. Después de calcular una serie de evoluciones para la temperatura y la velocidad del viento, Lorenz comprue-

ba un fenómeno curioso cuando redondea los valores de inicio (por ejemplo, la segunda cifra después del punto para la temperatura expresada en grados): al principio, las variables evolucionan en forma idéntica, después, al cabo de 10 días, 20 días, se ve aparecer una diferencia. Esta diferencia se ampliará en el curso del tiempo hasta llegar a ser considerable, y, finalmente, la curva calculada a partir de valores, condiciones "redondeadas", nada tiene que ver con la curva patrón. En estas condiciones, incluso repitiendo, clasificando, tanteando, le resulta imposible prever el clima a largo plazo si no ha simulado ya las condiciones exactamente con los mismos valores del inicio.

Su modelo es una simplificación atroz de la realidad. Lorenz llega a la conclusión de que los resultados que obtuvo —a saber, un comportamiento en extremo sensible a los valores iniciales, que vuelven prácticamente impredecible el futuro—, se aplican forzosamente a la realidad. Concluye, en consecuencia, que la meteorología a largo plazo es "congénitamente" imposible. ¡Para siempre! Los meteorólogos no son incompetentes, es el clima en sí mismo el que es imprevisible.

Intentando traducir con una imagen el enorme efecto a largo plazo de un cambio minúsculo en las condiciones iniciales, Lorenz recurrió a la imagen del batir de alas de una mariposa que, al modificar en forma imperceptible la dirección del viento en un lugar determinado, cambia por completo el tiempo que prevalecerá en ese sitio el año siguiente. Este ejemplo se volverá famoso y en la actualidad todavía se habla, entre iniciados, del "efecto mariposa".

El trabajo de Lorenz, publicado en 1963, suscitó poco interés entre los especialistas de la meteorología y permaneció sin conocerse fuera de esta comunidad. Sin embargo, sentaba los primeros avances en la teoría del caos.

Turbulencia

Independientemente de los meteorólogos y con objetivos más generales, los físicos reflexionan sobre el famoso problema de la turbulencia. Ya en la Antigüedad, Lucrecio había enunciado sus consideraciones sobre el tema. Navier había introducido sus famosos términos no lineales en sus ecuaciones destinadas a traducir el comportamiento de los fluidos. De hecho, no se comprendió bien lo que planteaba.

El físico soviético Lev Landau, que mereció el respeto de todos por haber mantenido a la física a flote durante su época de aislamiento detrás de la cortina de hierro, se dedicó al problema de la turbulencia.

Su conclusión es sencilla, lógica, y logra la unanimidad: la turbulencia se presenta en un fluido cuando éste tiene una infinidad de escalas

de organización, y cada escala es independiente de sus vecinas. De este modo pueden surgir torbellinos de tamaños diversos, entrelazados, vinculados, pero jamás organizados. En consecuencia, la transición hacia la turbulencia tiene que ser progresiva. Se parte de un flujo calmado a un flujo en chorros y se pasa a un flujo turbulento cuando aumentan su velocidad.

Lo malo con esta teoría lógica e ingeniosa es que no la confirman los experimentos, los cuales muestran que, en efecto, resulta sumamente brusco el "paso" del estado de flujo calmado al estado de flujo turbulento. Un pequeño cambio en la velocidad, y la apariencia del fluido se transforma por completo, nada resulta progresivo. ¿Cómo conciliar una hermosa teoría lógica con la rebelde experiencia?

Atractores extraños

Esta contradicción despierta en David Ruelle, teórico belga original y obstinado pero persuadido de que el experimento siempre tiene la razón, la idea de abordar el problema. Como él mismo dijo: "¡Desconocía yo todo al respecto, por lo que no había riesgos!"

Ruelle y Takens demuestran matemáticamente que el enfoque de Landau es falso. Para poner en marcha los fenómenos de la turbulencia, no se requiere que existan fluidos con numerosas escalas de organización;[6] bastan tres. El flujo tranquilo depende de dos escalas (la que fabrica los chorros y la que los conjunta); basta la aparición de una tercera más pequeña que las otras dos para perturbar la calma y desatar la turbulencia. De pronto se comprende la transición brusca. Pasar de dos al infinito, como lo deseaba Landau, requería de tiempo; pasar de dos a tres, por el contrario, era una transición "común", la cual puede ser repentina.

Al tratar de prever con sus ecuaciones el porvenir, de observar la manera en que éstas se comportan en el tiempo, Ruelle y Takens logran un resultado análogo al de Lorenz (cuyos trabajos desconocían): pequeñas variaciones en las condiciones iniciales bastan para modificar por completo el comportamiento posterior de un sistema.

Así, la turbulencia se presenta como un sistema desordenado, pero cuyo desorden está "convenido" entre ciertas fronteras. Se trata de un fenómeno complejo, pero no infinitamente complejo: lo provocan

[6] Que se traducen en frecuencias temporales.

Se trata de un parámetro un poco técnico, llamado número de Rayleigh. Es la relación entre las fuerzas que tienden a movilizar un campo del fluido y aquellas que tienden a impedir su desplazamiento.

tres parámetros que actúan en forma independiente. Sin embargo, como con las simulaciones de Lorenz, la evolución a largo plazo es impredecible.

Todas estas deducciones teóricas serán confirmadas experimentalmente por dos estadunidenses, Gollub y Swinney, quienes reproducen en el laboratorio la turbulencia de un fluido y muestran que ésta se presenta cuando la variable que describe el fluido fluctúa siguiendo tres ritmos independientes. La visión de Ruelle y Takens no constituye entonces una mera interpretación matemática general: constituye una teoría operativa.

Cuando se representan estos comportamientos en un espacio tridimensional, se trata de trayectorias que "giran" en torno a un "disco grueso", pero siguiendo trayectorias que jamás se confunden. Giran de manera extraña alrededor del atractor, permanecen dentro de cierto campo, pero sin caer nunca en un estado estable. Se llamará extraño a dicho atractor.

Convección

Otro fenómeno de la mecánica de fluidos que intrigaba a los físicos era el de la convección. Se trata del estudio del comportamiento de un fluido calentado por "abajo", por ejemplo, el de una cacerola de agua puesta sobre la parrilla de gas. Cuando se calienta un fluido desde abajo, su comportamiento depende, en principio, del grado de calentamiento. Cuando éste es bajo, el fluido se calienta, pero pierde poco a poco dicho calor a través de la superficie libre, sin moverse; cuando el calentamiento aumenta, en cierto momento el fluido empieza a moverse, de manera brusca, sin previo aviso. Se trata de otro fenómeno de umbral como los que hemos expuesto antes. El fluido se pone entonces en movimiento y se organiza: hay corrientes que suben al centro de la cacerola y bajan al fondo, a lo largo de las paredes. Si se calienta más, los movimientos se aceleran. Cuando se calienta mucho, ya no es una corriente la que sube: es toda una serie de "tubos" que suben y bajan, que se tocan y llevan a la superficie burbujas y borbotones.

De esta manera, al calentar se pasa de una situación en calma a un movimiento ordenado y después a una situación de movimientos desordenados. En otro contexto, esto se parece a los fenómenos de transición de fase estudiados por Ken Wilson.

Con un ligero desfase en el tiempo, este estudio será realizado por dos grupos franceses, uno en la Escuela Normal Superior, dirigido por Albert Libchaber, y el otro en el Centro de Estudios Nucleares de

Saclay bajo la dirección de Pierre Bergé, Yves Pomeau y Monique Dubois. Los primeros trabajan con células minúsculas, con fluidos de helio líquido; los segundos, con células de dimensiones más grandes, con fluidos variados.

Libchaber descubre primero la forma en que los movimientos del fluido evolucionan con el calentamiento. Muestra que dicha evolución no se queda en una o dos transiciones de régimen, como lo habíamos mencionado, sino que consiste en una familia de situaciones que se suceden cuando se calienta algo progresivamente. La evolución empieza en forma calmada, y después da un salto bruscamente; hacen su aparición entonces los llamados movimientos "de convección". Se trata de una corriente ascendente central y de corrientes descendentes periféricas. Al medirla, la temperatura varía con cierta periodicidad, con cierta frecuencia. Después, cuando el calentamiento aumenta, se observa la aparición de una segunda frecuencia: en lugar de una corriente ascendente, van a aparecer dos, después cuatro, después ocho, 16... los movimientos se vuelven por completo desorganizados, turbulentos, violentos. Se alcanza un verdadero caos. Cada cambio de estilo es brusco, sin signos precursores.

Este experimento resultará determinante; desatará incluso una verdadera cristalización intelectual. Una vez más se comprueba experimentalmente, en el mundo sensible, que es posible crear situaciones complejas a partir de un número reducido de variables. Lo que afirmaban los experimentos numéricos y las consideraciones de los matemáticos será confirmado por la naturaleza. ¡Y ella es el juez supremo!

Se verifica ahora un resultado curioso: si se comparan las tasas de crecimiento del parámetro que describe el estado del fluido,[7] cuando se pasa de un régimen a otro ¡se comprueba que todas son iguales a 4.6692016! Ese número, sin embargo, no es un número cualquiera. En la misma época, un estadunidense, Michel Feigenbaum, y dos franceses, Coullet y Tresser, demostrarán que cuando se estudia el comportamiento de ecuaciones no lineales tan sencillas como $x_{t+1} = a(x_t - x^2_t)$ con x entre 0 y 1, se comprueba que, según el valor de (a), el comportamiento de esta ecuación es extraño. Con un valor muy débil del parámetro (a), los valores tienden a un límite único; después, a medida que se aumenta (a), el valor de la variable fluctúa entre dos valores. Un nuevo aumento de (a) lleva a (x) a "fluctuar" entonces entre cuatro valores, después entre ocho, después 16 y, repentinamente la ecuación "enloquece", se desboca y arroja cualquier valor en desorden. Se trata del caos numérico. Cuando se comparan las tasas de aumento del parámetro (a) que corresponden a un cambio de comportamiento, ¡se encuentra 4.6692016! Y se encuentra el mismo número en tipos de

ecuaciones sumamente diversas, que presentan comportamientos de complejidad creciente. Se calcula el número con seis cifras después del punto: ¡y siempre es el mismo! Libchaber encuentra ese número en un experimento de convección. ¡Creemos estar soñando! Recordamos entonces los resultados de Wilson, la existencia de parámetros universales, transversales en relación con nuestras clasificaciones descriptivas de los sistemas... De esta manera, existen órdenes ocultos en la naturaleza, ¡y órdenes ocultos gobiernan el desorden!

El grupo de Saclay de Pierre Bergé completará ese enfoque. Bergé trabaja con dedicación en el comportamiento de un fluido en convección, cuando al aumentar el calor se pasa de un régimen a otro. Descubre que esta transición es un momento de desorden. Así, en función del calentamiento, la evolución del fluido puede dar por resultado la calma, el desorden, el orden, el desorden, el orden..., hasta alcanzar finalmente el desorden total: el caos. Todo sucede como si hubiera una lucha entre orden y desorden y que, a partir del orden completo —el flujo en calma—, se alcanzara, no por escalones, sino por alternancias, el desorden total, el caos. Al estudiar con mayor especificidad la transición final al régimen caótico, el grupo de Bergé demostró que un camino posible es el régimen de intermitencias, es decir, un sistema en donde el comportamiento es desordenado pero en el cual, periódicamente, se produce un suceso importante. Es el estadio último de la lucha entre el orden y el caos.

Al traducir este experimento a su forma matemática, el grupo de Saclay —que trabaja al mismo tiempo que un grupo estadunidense semejante— señala que cuando se traducen estos comportamientos a diagramas, se obtienen curvas, formas de apariencia "extraña", etc. Dicho de otra manera, el equipo francés descubre en los diagramas estructuras fractales.

Mandelbrot había definido los fractales para describir el mundo real; los teóricos del caos descubren estructuras fractales en los diagramas; pero ¿acaso los diagramas no son, como las ecuaciones de la física, traducciones de la realidad?

De este modo, todo se vinculará en lo que algunos llamarán la física del caos.

La fiebre del caos

A partir de ello cristaliza un movimiento encaminado a reunir todos esos conceptos. Yves Pomeau, Pierre Bergé y Monique Dubois en París, así como Shaw en Santa Cruz desempeñarán un papel importante en esa tarea: los primeros, al desarrollar una teoría general, y Shaw al

establecer el vínculo con la teoría de la información de Shannon y la negaentropía de Brillouin. Este esfuerzo de síntesis ocasiona de inmediato el rescate del olvido de los sorprendentes trabajos llevados a cabo por los matemáticos franceses como Poincaré a principios de siglo, y más tarde por Paul Lévy; por los rusos, Liapounov a principios del siglo, después Kolmogorov, Arnold y recientemente Moser; así como por los estadunidenses, en especial Smale.

Se instaura una formalización rigurosa (quizás un poco rígida). Los matemáticos contemporáneos se apoderan del tema. Físicos, médicos, biólogos, químicos y geofísicos empiezan a utilizar con todas sus fuerzas el caos. En ocasiones, como lo señala David Ruelle, a diestra y siniestra, pero qué importa, ¡la posteridad pondrá orden!

¿Qué se puede decir, por ahora, de todo este movimiento?

En primer lugar, que es muy reciente. Los intentos de formalización compacta son interesantes, pero no deben limitar el curso de las investigaciones a un contexto demasiado estrecho. ¡Demasiada teoría mata la teoría! Una vez precisado esto, la cosecha de conceptos novedosos resulta impresionante.

Nuestras firmes creencias se tambalean, como vacilaban las de los defensores de la física clásica cuando surgió la microfísica. ¡Comienza a caer el velo de la ignorancia! Detrás de todo ello se encuentra una palabra mágica: la no linealidad, que significa únicamente que no se respeta la relación según la cual los efectos son directamente proporcionales a las causas. El principio de causalidad simple, legado por los griegos y gracias al cual toda la física clásica se desarrolló, no es al parecer más que un caso particular de la naturaleza.

A partir de esta renuncia, nuestra visión de la naturaleza cambia de cabo a rabo. Ayer pensábamos que cuando un fenómeno se volvía complejo era porque obedecía a un mayor número de causas; a partir de ahora sabemos que no es necesariamente así. Un fenómeno puede ser simple o complejo y obedecer a las mismas leyes; basta que sean no lineales. Ya en 1910, Henri Poincaré escribió en forma profética: "Sin duda, si nuestros medios de investigación se volvieran cada vez más penetrantes, descubriríamos lo simple bajo lo complejo, después lo complejo bajo lo simple, después de nuevo lo simple bajo lo complejo y así sucesivamente, sin que podamos prever cuál será el último término".

Por último —y no es una de las consecuencias de menor importancia—, el reduccionismo simple es denotado. Entre el átomo y el cristal, entre la molécula y el líquido, entre el grano y el planeta, entre la materia y la galaxia, existe toda una serie de niveles superpuestos unos dentro de otros, organizados y reunidos. Entre estas escalas existen

organizaciones regidas por relaciones de orden y desorden: el orden de distancias pequeñas y el orden de grandes distancias; transiciones entre el orden y el desorden. En todas esas imbricaciones se descubren leyes generales válidas en todas las escalas, para toda clase de sistemas, lo cual abre la vía a una tipología de los sistemas que atravesará de manera terminante nuestras divisiones tradicionales, hasta llegar a mostrar, incluso que cierto tipo de cristal puede estar organizado ¡como una galaxia! Descubrimos leyes de organización; comprendemos cómo nacen las estructuras: la piel de leopardo, o los cristales zonificados, o el ala de la mariposa. Descubrimos también las relaciones sutiles que existen entre el orden y el desorden en el espacio y en el tiempo.

La frontera, antes infranqueable, entre el mundo determinista y el de las probabilidades se desvanece, pues ecuaciones perfectamente determinadas gobiernan lo imprevisible. Una nueva física estadística se encuentra en vías de nacimiento, ya no fundada en el azar puro, sino en reglas de organizaciones perturbadas por fluctuaciones. ¡El orden en el azar! Una pseudoestadística...

Y, algo aún más profundo, salimos de una visión del mundo y de las leyes de la naturaleza donde las causas producían efectos de su misma magnitud, donde el orden, la simetría perfecta y el equilibrio constituían las palabras clave, las referencias, los modelos. Entramos a un mundo donde nos damos cuenta de que el desorden es creador, donde la simetría, se ha roto, donde los defectos son fértiles, donde los desequilibrios son permanentes, donde las causas y los efectos presentan relaciones complicadas. ¡Qué derrota para Platón! Si Dios es un géometra, como él sostuvo, ¡es un geómetra fractal! Decididamente, el círculo no constituye la forma de referencia, y el número "preferido" no es el 7 de los griegos, sino el 4.6692016...

XI. NEURONALES

JIM WATSON, uno de los científicos que descubrieron la estructura del ADN, declaró recientemente que los próximos cincuenta años estarán dedicados al estudio del cerebro. Esta declaración por parte de un biólogo eminente, antiguo compañero de Francis Crick, quien también goza de amplio reconocimiento como especialista en las neurociencias, muestra tanto la actualidad del tema como el camino que falta por recorrer para descubrir las claves en este campo del conocimiento.

Desde hace quince años, las neurociencias han logrado, efectivamente, progresos extraordinarios, sobre todo gracias a la combinación de enfoques múltiples. Esta conjunción ha implicado, además, una modificación semántica de nomenclatura: la antigua trilogía neuroanatomía, neurofisiología, neuroquímica, se convirtió en neurociencias. En contrapartida, las neurociencias todavía no logran verdaderamente encontrar un paradigma, el modelo unificador que les permita en verdad "despegar"; por ejemplo, permitir la convergencia entre el estudio neurológico del "funcionamiento" y los estudios del "comportamiento", que abarcaría e incluiría los estudios de las ciencias humanas: psicología, lingüística e incluso sociología. De cualquier modo, progresos recientes son tan impresionantes que de aquí en adelante constituyen una ciencia de primer orden cuyos logros modifican de manera radical numerosas ideas preestablecidas, más o menos populares o "intuitivas". No intentaremos describir estos logros en detalle, pero sí tratamos de esclarecer sus rasgos significativos para el "hombre común" de fines de siglo.

COMPLEJIDAD

La primera enseñanza de las neurociencias modernas es la extraordinaria complejidad del cerebro, que rechaza cualquier enfoque analítico "paso a paso".

El cerebro está constituido por una asociación intregrada de células muy especializadas, las neuronas, las cuales poseen una propiedad fisiológica que las distingue del resto de las células vivas: sólo se reproducen durante la fase embrionaria y en la infancia. Cuando se destru-

yen las células nerviosas de un adulto, por ejemplo, debido a un accidente o por envejecimiento, las neuronas no se regeneran o lo hacen en una proporción sumamente reducida.

Estas células nerviosas no son todas idénticas; poseen formas, funciones y ubicaciones diversas. Se clasifican en células piramidales, en estrella, en grano y las más espectaculares son las células de Purkinje del cerebelo. Las células nerviosas se distribuyen en las regiones del cerebro de muy diversas maneras, pero todas ellas comparten en cierta medida el mismo modelo: un cuerpo celular central, el soma, del cual parte, por un lado, una serie de filamentos anastomosados, las dendritas, y por el otro, una prolongación alargada, el axón, que se subdivide en su extremo. De manera esquemática, una neurona se asemeja a un esqueleto de árbol alargado, en el cual las dendritas constituirían las ramas y el axón el tronco, con raíces en el extremo, aunque raíces muy flexibles. Como cualquier célula, la célula nerviosa posee un núcleo cuya actividad se mantiene gracias al consumo de cierta cantidad de energía. Lo que distingue a la neurona de la célula común radica en que su mecanismo celular no se orienta a la reproducción celular, sino a la actividad funcional, excepto en las etapas de la juventud.

Otra particularidad de las células nerviosas radica en que no constituyen un tejido adherente como las demás células, sino una red en medio de otras células, llamadas células gliales.[1] De hecho, las terminaciones de axones se "empalman" con las dendritas para constituir las sinapsis.

Cada neurona se encuentra en contacto con miles de neuronas vecinas y, mediante una red intermediaria, en contacto potencial con millones de neuronas más.

Tenemos aquí, entonces, una red de cables muy ramificados, cuya dimensión aún no está calculada. En la corteza cerebral de un animal superior, es decir, en la zona fundamental de los cerebros "evolucionados" (el nuestro, por ejemplo) existen alrededor de cien mil millones de neuronas, lo que correspondería a un billón de conexiones posibles. En la cabeza de un cerillo, ¡mil millones de conexiones posibles!

Hay que dejar muy claro que tales conexiones no son permanentes. Las neuronas no se vinculan entre sí de manera rígida; lo hacen a través de relaciones de contigüidad, no de continuidad, lo cual resulta fundamental, pues tales vínculos le otorgan a la red neuronal la propiedad de la adaptabilidad. En otras palabras, la red de neuronas es

[1] Parece que las células gliales desempeñan un papel metabólico, mientras que las neuronas desempeñan un papel de trasmisoras de información. En síntesis, ¡las células gliales se encargan del mantenimiento, y las neuronas de la comunicación!

frondosa, densa, multiforme, fractal, quizás, pero con la virtud de realizar conexiones flexibles. En cuanto al grado de complejidad, Gerald Edelman afirma que no existe nada que se le compare en el universo, ¡ni el universo mismo!

En esta red de neuronas circula la información: la que se recibe e "interpreta" y que proviene del mundo exterior: visual, auditiva, táctil...; la que se trasmite a los diferentes órganos del cuerpo: corazón, pulmones, músculos...; en fin, la información que secreta el propio cerebro.

¿Cómo circula la información en la red normal? La conducción de lo que se denomina el flujo nervioso se efectúa a través de dos mecanismos complementarios, pero distintos.

Transmisión nervioso

El primer proceso es el que hace circular el impulso nervioso de un extremo a otro de la neurona. El segundo es un proceso químico y, en muy raras ocasiones, eléctrico, cuya función consiste en llevar a cabo la comunicación entre las neuronas.

Desde hace mucho tiempo se sabe que existe una relación entre electricidad impulso nervioso. En el siglo XIX, cuando la física de la electricidad estaba apenas en sus comienzos, Galvani había provocado contracciones en las patas de ranas mediante la conexión de ciertos nervios a una pila eléctrica. A finales de ese siglo, el físico Helmholtz había determinado que los nervios eran el foco de señales eléctricas que se propagaban a una velocidad de 50 metros por segundo (¡su padre no lo había creído!). Hacia 1930, el alemán Hans Berger había demostrado, colocando electrodos en la piel del cráneo, que el cerebro emitía señales eléctricas. Había comprobado asimismo que la actividad eléctrica, en forma de impulsos sucesivos, se correlacionaba con el grado de atención del paciente. Pero no fue sino hasta muchos años más tarde cuando, con ayuda de microelectrodos colocados en las paredes neuronales, se descifró y posteriormente se comprendió el significado de tales señales eléctricas.

En un principio, se descubrió que cada neurona es el foco de señales eléctricas "espontáneas", a un ritmo de entre 10 a 50 por segundo. De modo que la red de neuronas vibra en todo momento con estos impulsos múltiples, y esta suma de vibraciones fue la que registró Hans Berger; pero los impulsos eléctricos inducidos desde el exterior pueden también propagarse en la neurona.

El registro de señales nerviosas ha permitido comprobar que éstas se

propagan como ondas eléctricas solitarias cuya duración no sobrepasa la de unos cuantos milisegundos, con una velocidad de propagación que va de 50 a 100 metros por segundo (estamos lejos de los 300 000 km/segundo de la velocidad de la luz). La amplitud de los impulsos nerviosos es del orden de un décimo de voltio y permanece constante a lo largo de la propagación de la señal, sin disminuir. El "tamaño" del impulso no es entonces lo que distingue a una señal de otra; una emoción grande o pequeña no se traducen en una señal más o menos grande. Del mismo modo, la información respecto a un color o a un olor se conducirá con un impulso eléctrico de igual intensidad.

¿Existe alguna diferencia entre las señales que conducen información diferente? Volveremos sobre este punto. Todas estas observaciones requieren antes una explicación: ¿cuál es el mecanismo físico de propagación del impulso nervioso? La respuesta a este problema reside en las propiedades "mágicas" de la membrana de la célula nerviosa. La genética concede el papel principal al núcleo celular; la neurología coloca al frente a la membrana, la frontera que separa la célula del exterior.

Señales eléctricas

Gracias a los trabajos de Hodgkin y Huxley en 1959, se comprendió el mecanismo exacto de propagación de los impulsos nerviosos en las neuronas. Los dos ingleses emplearon los nervios gigantescos de los calamares para efectuar experimentos determinantes sobre el funcionamiento de las membranas de las células nerviosas de estos moluscos.

Descubrieron así que las señales eléctricas son resultado de los movimientos de los iones[2] de sodio y potasio, cuyas concentraciones difieren dentro y fuera de la célula. El vaivén de estos movimientos está regido por canales que se abren o se cierran, así como por una enzima que funciona como bomba, y es capaz de expulsar los iones del interior de la célula. Así aparece entonces un impulso eléctrico de 100 milivoltios, a partir del cual el impulso se propaga a lo largo de la membrana a una velocidad de entre 50 y 100 metros por segundo, como lo había observado Helmhotz.

La energía necesaria para esta propagación de la señal eléctrica la proporciona una reacción bioquímica. Como en muchos de los mecanismos celulares, esta energía es transportada por la molécula de ATP.[3] En el caso de las células nerviosas, la enzima-bomba rompe la molécu-

[2] Recordemos que los iones son átomos que han perdido o ganado electrones, por lo que están cargados eléctricamente: unos positivamente (los cationes) y otros negativamente (los aniones).

[3] Adenosín trifosfato.

la y recobra su energía de conexión, con el fin de asegurar su propio funcionamiento.

En resumen, la propagación del impulso nervioso en las neuronas es un fenómeno electroquímico de membrana que está controlado por las enzimas.

NEUROQUÍMICA

La transmisión del impulso nervioso entre las neuronas permaneció mucho tiempo en el misterio; a veces se efectúa de manera eléctrica, pero la mayoría de las veces se realiza de manera química. La transmisión química se realiza en dos tiempos: en las terminaciones del axón, la llegada de una señal eléctrica dispara la apertura de canales que liberan una molécula especial llamada mediador químico. El más conocido de los mediadores es la acetilcolina. Liberada por la sinapsis, se propaga hacia otra neurona. Sin embargo, para recibirla, para aceptarla, se requiere una molécula en extremo específica, cuya estructura es "complementaria" de la acetilcolina: el receptor de la acetilcolina.

Esta sustancia fue descubierta por Jean-Pierre Changeux como resultado de experimentos con el pez eléctrico *gymnotus,*[4] cuyas descargas eléctricas son tan fuertes que liberan cantidades enormes de acetilcolina y de su receptor. Este receptor es una de esas moléculas "especiales" que se forman alrededor de un canal iónico, que pueden abrir y cerrar y así dejar pasar o no los iones de potasio y sodio. De esta manera, el proceso de trasmisión electroquímica se inicia en la neurona adyacente. Así es como se propaga el impulso nervioso de neurona en neurona.

El descubrimiento de los mecanismos de transmisión del impulso nervioso a través de los mediadores químicos constituye una etapa fundamental en la comprensión del funcionamiento del sistema nervioso. De entrada, explica por qué ciertas sustancias químicas actúan sobre el sistema nervioso y sobre el psiquismo: por ejemplo, por qué el fumador tiene la impresión de pensar o escribir mejor con un cigarrillo. La estructura química de la nicotina se parece de manera extraña a la de la acetilcolina, su absorción estimula las funciones cerebrales. El inconveniente es que al cabo de cierto tiempo se produce un fenómeno de adicción, que lleva al cerebro a gastar cada vez más acetilcoli-

[4] El gymnotus descarga impulsos eléctricos de 0.5 amperes de intensidad y 600 voltios. Tres descargas matan a un hombre. Su sistema nervioso, que abarca mil millones de sinapsis, constituye un verdadero cultivo de sinapsis, que puede tratarse químicamente para extraer sus diversos compuestos químicos.

N.T. Nombre en latín: Gymnotus carapo; nombres comunes: pez cuchillo, pez rayado, peces ratón o señoritas, "morenita".

na: cuando ya no puede hacerlo, impulsa a fumar más o a consumir drogas. Se comprende también por qué el veneno de la cobra o el curare, veneno elaborado por los indígenas de la Amazonia, matan al paralizar los músculos del pulmón y del corazón. Tales sustancias poseen una estructura química que bloquea el receptor de la acetilcolina. Por esta misma razón ciertas drogas perturban el sistema nervioso, inhiben el placer o, por el contrario, lo estimulan, mejoran la vista o causan ceguera. Los neurotransmisores son múltiples: a la acetilcolina debe agregarse el glutamato, la dopamina, pero también los ácidos aminados (la noradrenalina), las proteínas (el GABA),[5] e incluso el óxido de nitrógeno (NO).

En cada ocasión, las especificidades moleculares de receptores específicos son reconocidas por tal o cual tipo de neuronas. Se crea así una química molecular de relaciones sinápticas, que estudia uno de los elementos fundamentales del funcionamiento del cerebro, ya que en los cruces químicos es donde se determinan los cambios, las distorsiones y los paros de funcionamiento cerebral. La complejidad de este funcionamiento crece cada vez más en la medida en que las conexiones potenciales de la red neuronal se amplifican debido a la variabilidad del tipo de comunicaciones químicas.

Esta química del cerebro se impone cada vez más en la actualidad. Por ejemplo, hay cierta inclinación a pensar que el mal de Parkinson se debe a la degeneración de algunas células que operan con un mediador llamado dopamina. De hecho, la inyección de esta sustancia tiene un efecto compensador que atenúa los efectos de la enfermedad. Se intenta una operación similar para otro mal neuronal, el Alzheimer, con el uso de la acetilcolina, aunque su éxito es todavía limitado. Se tratan también las depresiones nerviosas con diversos productos químicos; los resultados son a menudo irrefutables.[6] Todos estos casos demuestran la importancia de la neuroquímica e indican también que estamos lejos de haber descifrado el funcionamiento total de la fábrica de la química cerebral.

Examinemos ahora la "mecánica" interior que entra en juego durante la trasmisión de información de neurona a neurona.

Aritmética neuronal

Algunos mediadores abren canales al ión de sodio, otros al de potasio, otros al de calcio, pero también abren canales al ión de cloro, que

[5] El GABA es el ácido gama-aminobutírico, $C_4H_9O_2N$.
[6] D. Widlöcher, La Logique de la dépression, París, Fayad, 1995.

posee carga eléctrica negativa, al contrario de los otros. Esto permite entender por qué algunos cambios de la red neuronal se activan y otros no. Los neurotransmisores cumplen, así, un papel fundamental en la activación de tal o cual ráfaga de influjos nerviosos o, al contrario, en su inhibición. La entrada de un ión negativo, como el de cloro, inhibe; la entrada de un ión positivo, como el de sodio o de calcio, activa.

Imaginemos una neurona conectada a varias sinapsis de neuronas diferentes; una de ellas abre canales de sodio, otras dos abren canales de cloro, una cuarta neurona controla canales de calcio. Cuando decimos "abre" o "controla" significa: por mediación de las parejas "neurotransmisores/receptores". Cada momento, la neurona realiza una suma. Si las cargas negativas superan a las positivas, no se trasmite ninguna señal; si sucede lo contrario, se activa un impulso nervioso.

He aquí una regla aritmética que permite comprender cómo se realiza la combinación de información en cada nodo de la red neuronal.

Se percibe el modo en que funciona la red neuronal, ¿pero qué código utiliza?

El código nervioso, cuyos detalles falta descifrar, está conformado por un conjunto de señales eléctricas. Una señal es una serie de hileras de impulsos más o menos modulados, separados por silencios pero idénticos en forma e intensidad. El ritmo, la secuencia, es lo que caracteriza a la señal, no su intensidad. En cada cruce, la señal se dirige, se "propone" a todas las neuronas adyacentes. Una la acepta, otra la apaga porque recibió una señal de inhibición. De esta manera, la señal se propagará en la red, siguiendo, sin embargo, trayectorias específicas, químicamente determinadas.

Todas estas reglas deben ser ubicarlas en el contexto específico de la red neuronal. Las conexiones neuronales, ya lo dijimos, no son permanentes. La falta de uso puede hacer que se marchiten y mueran, es decir, se desconecten. De manera que el "cableado" de la red neuronal evoluciona en función del uso, del aprendizaje. El funcionamiento de la pareja neurotransmisor/receptor desempeña un papel muy importante en ese mantenimiento.

Cerebro

Hasta el momento, hemos hablado del cerebro como tejido vivo, organizado en una red ultracompleja capaz de llevar a cabo la circulación de señales dentro de este conjunto. Examinemos brevemente su estructura general y sus funciones.

La red neuronal del cerebro está conectada por los nervios a los diferentes órganos del cuerpo: al corazón y los pulmones, cuyo ritmos regula a través de automatismos vitales; a los músculos, a los que transmite instrucciones de contracción o relajación; a los órganos de los sentidos: ojos, oídos, nariz, mediante los cuales recibe las sensaciones del mundo exterior. Existe un sistema aferente, que es el encargado de llevar la información, y un sistema eferente que, a la inversa, trasmite las instrucciones provenientes del cerebro a los órganos. Uno y otro funcionan con nervios, que son aglomeraciones de axones conectados.

Resulta interesante señalar que el número de nervios que salen del cerebro hacia los órganos periféricos, a los cuales éste controla o "escucha", es escaso en comparación con el número de conexiones neuronales dentro del mismo cerebro. Se trata de nervios que ponen en operación menos circuitos neuronales. Así que casi se puede decir que el cerebro está fundamentalmente en contacto consigo mismo y que sus conexiones con el exterior son mucho más limitadas. Se comprende por qué los estudios sobre tal o cual mecanismo particular –vista, oído, control del ritmo cardiaco– están mucho más avanzados que los estudios sobre el funcionamiento del cerebro mismo.

El cerebro transmite sus órdenes o recibe información de los órganos a través de los mismos mecanismos de la conexión neuronal: señales eléctricas transferidas por mediadores químicos. Así, un nervio llega cerca de un músculo en el que descarga, cuando así se requiere, una inyección de mediador químico cuya acción consiste en contraer el músculo. El ojo o el oído le transmiten al cerebro la información que reciben en forma de señales eléctricas.

La red neuronal del cerebro está organizada y jerarquizada para responder a todas esas funciones. La anatomía del cerebro muestra diversas zonas distribuidas de manera muy precisa. Entre los médicos que han dejado su huella en estudios anatomo-fisiológicos, el francés Broca y el español Ramón y Cajal gozan de reconocimiento universal. De manera progresiva se ha venido conformando una cartografía cada vez más precisa del cerebro según sus diversas funciones.

El cerebro se desarrolla a partir de un tubo hueco. Del lado de la cabeza, el tubo forma tres vesículas que delimitan el cerebro anterior, medio y posterior. El resto del tubo constituye la médula espinal; el cerebro anterior forma por un lado la corteza cerebral, por el otro, el tálamo y el hipotálamo. El cerebro posterior comprende el bulbo raquídeo, el puente y el cerebelo. Junto con el cerebro medio y el tálamo, el cerebro posterior forma el tronco cerebral. Su papel tiene importancia sobre todo en las funciones de control automático (respiración,

ritmo cardiaco, digestión), así como en la selección y repartición de la información.

Cartografía y homúnculo

El cerebro central se encuentra cubierto con una envoltura que presenta una gran cantidad de extraños pliegues, a la que está conectado: la corteza cerebral, corteza que constituye la parte "esencial" del cerebro humano, pues en ella se encuentran el centro del lenguaje, del pensamiento, y el centro de análisis de todas las señales sensoriales. La corteza está formada por una capa de neuronas insertadas en una "materia gris" que cubre una capa más espesa de materia blanca. Recubre las partes superior y laterales del cráneo. Tiene innumerables pliegues: si se desplegara, la corteza humana tendría la dimensión de un mantel de mesa y un espesor equivalente. Nuestra inteligencia se encuentra, en consecuencia, contenida en su totalidad en un tejido vivo delgado, arrugado, de aproximadamente 1 m^2. Lo que maravilla es que, para analizar el mundo en tres dimensiones, ¡nuestro cerebro se vale de un órgano casi bidimensional!

En la actualidad se dispone de una verdadera cartografía de la corteza en cuanto a sus diversas funciones. La primera fuente de información proviene por desgracia de las lesiones cerebrales, accidentales o congénitas, y de sus consecuencias en el comportamiento. A partir de ello ha sido posible diseñar un mapa general del cerebro (el primero fue obra de Gall), en el que zonas diversas corresponden a funciones definidas; además, en cada caso, hay zonas "centrales" y zonas "fronterizas" con funciones más "difusas". Estos estudios han llegado poco a poco a resultados cada vez más precisos. Citemos dos de ellos, que hemos seleccionado porque son célebres y nos informan sobre dos aspectos en extremo importantes.

El primero es la ruptura de vínculos entre la corteza derecha y la corteza izquierda. Desde el siglo XIX, en especial a partir de los trabajos de Broca, se sabe que el cerebro está compuesto de dos hemisferios ligados entre sí por un gran haz de fibras: el cuerpo calloso. La cartografía del cerebro nos ha enseñado que, esquemáticamente, el hemisferio izquierdo se especializa en el manejo de símbolos: el lenguaje, el cálculo; el hemisferio derecho se encuentra más especializado en la percepción del espacio. Si quisiéramos caricaturizarlo burdamente, diríamos que "el izquierdo es más abstracto y el derecho más concreto". Además, de manera sorprendente, las grandes vías de comunicación cerebrales están cruzadas: el ojo derecho se comunica con el hemisferio izquierdo, y viceversa; la corteza motora derecha

ordena al brazo izquierdo, etc. En consecuencia, para tratar los problemas agudos de epilepsia, los cirujanos llegan en ocasiones a seccionar el cuerpo calloso de algunos pacientes, cortando a la vez la conexión entre los hemisferios derecho e izquierdo. ¡Lo curioso es que tales pacientes viven a primera vista "normalmente" con dos cerebros independientes! Sin embargo, al observarlos más de cerca se ve que padecen algunos problemas; el estudio de tales anomalías para obtener información fundamental sobre el cerebro constituye el mérito de Sperry. Así, cuando uno de estos pacientes ve aparecer la palabra *tuerca* a la izquierda de una pantalla y la palabra *llave* a la derecha, afirma que vio la palabra *llave*, pero su mano izquierda decide tomar la tuerca en lugar de la llave. Si se pregunta al paciente lo que ha tomado, responde: la llave; está consciente de haber tomado una llave. Si se sabe que el ojo derecho "se expresa" en el hemisferio izquierdo y viceversa, y que el hemisferio izquierdo contiene el centro del lenguaje, el experimento descrito llevó a Sperry a concluir que el centro del lenguaje y el centro de la conciencia (en el sentido de estar consciente) son vecinos y están situados en el mismo hemisferio (el izquierdo para la gran mayoría).

Broca y Wernicke condujeron otra serie de observaciones célebres que se refieren al terrible mal llamado afasia: la pérdida del lenguaje.

Broca comprueba que el paciente con cierta zona cerebral dañada (que lleva desde entonces su nombre) se expresa con incoherencias. Parece comprender lo que se le dice, pero su lenguaje es incomprensible. Años más tarde, Wernicke descubrió otra zona, situada más atrás, que si es afectada produce también afasia. En este caso, el paciente habla con frases correctas, pero que puestas una tras otra no quieren decir nada. El paciente parece no entender lo que se le dice. Ambas zonas, la de Broca y la de Wernicke, se encuentran situadas en la parte izquierda de la corteza. La zona de Broca es la zona de la expresión; la de Wernicke, la zona de la recepción, de la comprensión. En un individuo sano, las dos zonas se comunican; en una persona con problemas, funcionan una sin la otra.

Estos dos ejemplos demuestran lo mucho que han contribuido las observaciones clínicas de los médicos al progreso de la neurobiología, y por qué resultan irremplazables.

Otro método utilizado para "cartografiar" el cerebro es el de la electrofisiología, la cual consiste en estimular alguna parte de la corteza cerebral con una pequeña descarga eléctrica y observar su efecto en el comportamiento del sujeto. Naturalmente, el método no puede aplicarse más que en los animales y muy excepcionalmente en el hombre.

Los resultados que se han obtenido con tales exploraciones sistemá-

ticas son impresionantes. Se ha comprobado que si se estimula cierta zona de la corteza, el dedo pequeño de la mano izquierda se mueve; si se desplaza el estímulo algunos centímetros, el dedo índice es el que se activa, etc. Este experimento en el cerebro de diversos animales permite dibujar verdaderos mapas de los órganos de estos animales. Cada tipo de animal encierra en su corteza cerebral una verdadera imagen en dos dimensiones de su cuerpo, órgano por órgano, zona por zona. Este mapa que se extiende a lo largo de la corteza se llama homúnculo. Al examinar más de cerca los homúnculos de diversos animales, se comprueba que no son homotéticos de los órganos del animal. Ciertas zonas que corresponden a funciones específicas del animal se encuentran especialmente extendidas: el bigote en el gato, la mano en los monos, la mano y la boca en el hombre. Al estudiar detenidamente los homúnculos del macaco o del erizo, se comprueba que no existe un órgano, una figurilla, sino toda una serie de mapas distribuidos en varios lugares, y cada representación cuenta con una función específica. Uno de los mapas corresponde a los receptores de la piel, otro a los músculos de la piel. Todos estos micromapas están estrechamente ligados entre sí, de modo que la imagen que se tiene del homúnculo no es la de un mosaico único, sino de una serie de micromosaicos densamente vinculados entre sí.

En fechas muy recientes, se ha podido detallar aún más esta cartografía neuronal, gracias al uso de una tecnología maravillosa, los rastreadores (*scanners*), medios no destructivos para proyectar imágenes. Las primeras técnicas empleadas fueron la inyección de marcadores radiactivos, después la cámara de positrones y actualmente los instrumentos de resonancia magnética nuclear, o los que miden directamente la actividad magnética. Estos aparatos permiten localizar las zonas del cerebro que consumen energía (y por lo tanto queman oxígeno) durante la actividad cerebral.

Se puede, así, solicitar a un paciente que ejecute una por una diferentes actividades cerebrales: pensar en una buena comida, imaginar el rostro de un enemigo, cantar, etc. En cada caso, se observa la o las zonas del cerebro que se activan. Ya se ven las extraordinarias perspectivas que se abren con estos métodos. Será posible determinar las zonas del pensamiento, del placer musical o sexual, etc. Sin embargo, estos métodos no cuentan con la resolución suficiente para alcanzar el nivel de los micromosaicos. Hemos de contentarnos por el momento con una información sólo medianamente integrada.

De este modo, el cerebro se organiza en zonas especializadas, pero los objetivos de esas zonas jamás son únicas, sino siempre múltiples. Por ejemplo, el estudio pormenorizado de los procesos visuales de

Hubel y Wiesel permitió descubrir que el cerebro opera "en paralelo". Cuando vemos un automóvil rojo avanzar, "vemos" por separado una forma que identificamos con el objeto automóvil, un color rojo y un movimiento. (Es posible demostrar que por lesiones ocurridas en algunas áreas el individuo queda privado de una u otra de estas percepciones separadas.) Naturalmente, después de ello, el cerebro es capaz de efectuar la síntesis de toda la información y de obtener el objeto mental: automóvil rojo en movimiento. Además, las zonas que captan la información primaria se encuentran dispersas en lugares diferentes. De modo que el cerebro funciona en paralelo para adquirir la información.

Todas estas observaciones, estos experimentos y estas pruebas permiten en la actualidad representarse la manera en que funciona el cerebro.

Cerebro y computadora

Antes de abordar este tema es necesario plantear una hipótesis: la de la analogía cerebro/computadora. En efecto, el cerebro recibe información del mundo exterior, la guarda, la codifica, la elabora, le da un tratamiento, la analiza y reacciona a su vez a estos impulsos. El cerebro utiliza entonces una función de memoria, "reglas de cálculo", una codificación y una decodificación, es decir, un verdadero lenguaje interno. Resulta tentador, en consecuencia, considerarlo como nuestro computador individual. Y ya que el cerebro humano fabricó la computadora, ¿por qué no la habría hecho a su imagen y semejanza?

Esta analogía resulta seductora intelectualmente, pero por desgracia es falsa, como veremos.

En principio, la velocidad de circulación de la información es muy diferente. En una computadora, la información circula a una velocidad de varios miles de kilómetros por segundo. En el cerebro, el influjo nervioso se propaga, a lo sumo, a 100 metros por segundo. Aunque tanto la computadora como el cerebro trabajan muy rápidamente, en las prácticas de reconocimiento (reconocer un árbol, un automóvil, etc.), el segundo es más rápido que la primera.

La segunda diferencia radica en que el cerebro no cuenta con un programa preestablecido que le ordene a tal neurona o a tal ramificación lo que deba hacer. No existe ningún órgano que organice la información; el cerebro es un sistema autoprogramado. Esto resulta más evidente cuando se recuerda que el cerebro humano actual es el resultado del proceso evolutivo y del factor fundamental de éste: la selección natural.

La memoria del cerebro nada tiene que ver con la de la computadora. La memoria de una computadora se compone de elementos que almacenan infomación 0 y 1 (como en el caso de un disco magnético). Cuando la necesita, la computadora lee esa información. En el cerebro, nadie ha demostrado jamás que las neuronas tengan posiciones abiertas o cerradas y que almacenen información. Además, la cartografía cerebral no distingue entre la zona de la memoria y la zona del pensamiento. Efectuamos cálculos, hablamos, reflexionamos y guardamos datos en las mismas zonas del cerebro. ¡La memoria no es un órgano autónomo con "entradas" y "salidas"!

En fin, la última diferencia con la computadora es el "cableado", es decir, la red de neuronas. Esta no es fija: es flexible, maleable y evoluciona a lo largo de la vida.

Los objetos mentales

Examinemos las ideas que han planteado los neurocientíficos modernos sobre el funcionamiento del cerebro. No se trata ciertamente de ideas definitivas, sus modalidades varían de acuerdo con sus autores, pero la trama general de los modelos modernos parece, no obstante, converger, trátese de Changeux, de Edelman, de Zeki o de Damasio. Las ideas centrales son las de red y "grafo de representación", propuestas por Jean-Pierre Changeux.

Consideremos primero el ejemplo de la vista. Cuando vemos un objeto, la vista activa señales eléctricas codificadas en las zonas receptoras de la retina. Las señales se propagan en las redes locales y definen cierta figura de conectividad, un grafo (o varios grafos si se trata de varias zonas). Este grafo constituye la imagen neuronal del objeto. No se trata de un concepto etéreo que "flota en el aire", sino de un verdadero objeto neuronal que posee una realidad física determinada por las conexiones que la forman.

Otro objeto visto va a "dibujar" otro grafo neuronal, etc. De manera que no son las neuronas las que codifican tal o cual objeto: es el grafo, la red de conexiones sensibilizadas, "activadas" por objetos diversos.

En este nivel, se requiere la participación de otra propiedad de los circuitos nerviosos, los que, al revés de la pila Wonder, ¡se agotan si no se les usa! Entre más se use un circuito neuronal, menos se "oxida" y está en mejor forma.

Cuando se forma un grafo neuronal para traducir la existencia de un objeto, los elementos del circuito están activos. Si se les solicita una segunda vez, el objeto mental se crea aún más rápidamente, pues los

circuitos que constituyen su grafo ya estuvieron en operación. De esta forma se establece el fenómeno de la memoria. ¿Se amplifica este fenómeno con el acercamiento entre la sinapsis y el receptor? Quizás. ¿Se estabiliza mediante el acercamiento de las sinapsis de la zona receptora, o por el reforzamiento de los mecanismos emisor/receptor de los mediadores químicos? Sin duda, pues ciertamente existe un fenómeno de estabilización de los circuitos de la memoria. Comprendemos así por qué memoria y pensamiento toman forma en las mismas zonas del cerebro. La memoria es el reforzamiento, la perennidad del pensamiento mediante la estabilización de los circuitos neuronales.

Derivemos de inmediato una conclusión importante. La memoria no es innata; se fabrica y se mantiene. Algunos individuos cuentan con químicas especiales que estabilizan mejor que en otros individuos sus grafos neuronales, pero podemos pensar también que algunas personas pueden adquirir esta misma facultad mediante el aprendizaje.

El pensamiento

¿Cómo pasar de los objetos mentales surgidos de la realidad a los objetos mentales ficticios, inventados, imaginados? El cerebro humano posee esta propiedad extraordinaria de poder sintetizar un pensamiento. No se contenta con analizar una sensación externa o con "sacar conclusiones", eso lo pueden hacer los animales. El cerebro humano inventa situaciones, crea objetos mentales. Esta cuestión ya ha sido resuelta por las teorías modernas. Desde el momento en que el cerebro puede fabricar grafos neuronales que traducen los "objetos reales" ("objetos" puede considerarse aquí en el sentido general de objetos visuales, pero también olfativos o sensoriales), ¿por qué no iban a combinarse partes de los grafos para sintetizar un concepto original? De modo que, a partir de lo real, ¿por qué no podría el cerebro elaborar "grafos neuronales" sintetizados que no tuvieran ninguna correspondencia con lo real, es decir, abstractos? Claro está que la explicación del lenguaje entra bien en este modelo: adquisición de palabras, verbos, combinaciones para dar origen a las sintaxis, a la variabilidad de los idiomas, todo lo cual puede explicarse mediante los grafos neuronales, sin dar por ello la razón a la teoría de Chomsky, basada en la idea de programación y en la analogía con la computadora.

Se observa aquí un principio de respuesta al enigma del pensamiento "abstracto", que, señalémoslo, parte siempre de lo real, ya se trate

de música, ficción o matemáticas. Lo real permite elaborar los grafos neuronales primarios; la combinatoria neuronal construye a partir de esos grafos otros grafos nuevos muy reales en el cerebro, pero ficticios con respecto al mundo exterior. El pensamiento abstracto es una recombinación de la percepción de lo real.

La piedra angular la constituye aquí la realidad física de los objetos mentales, concepto esencial en Changeux. Shepard y Judo llevaron a cabo un experimento fundamental para comprobarlo. Se elabora en la computadora un objeto en el espacio, un volumen que se presenta a un sujeto; después se hace girar el objeto y se presenta, en consecuencia, bajo una nueva cara, un nuevo ángulo. Se le pide al sujeto que lo reconozca. Se le hace girar una vez más. Se pide al sujeto que lo reconozca de nuevo, y así se continúa. Se comprueba que existe una relación matemática entre la magnitud del ángulo en el cual se hizo girar al objeto y el riempo que el sujeto emplea en reconocerlo. El paciente también hace girar el objeto dentro de su cabeza. ¡Modifica la estructura de su grafo!

Es verdad que la idea de grafo neuronal resulta más compleja que unas cuantas conexiones dibujadas en tal o cual parte del cerebro. Sin duda, diferentes zonas registran simultáneamente, se comunican entre sí, "se controlan"; los controles paralelos son probablemente múltiples, de manera que la información se recorta y reagrupa. Algunas teorías elaboran modelos un poco diferentes de los grafos neuronales y hablan, por ejemplo, de "mapas neuronales" (Edelman), o de grupos de neuronas relacionadas, etc. Se encuentran ahí de seguro diferencias específicas en cuánto al funcionamiento, pero en el fondo la idea general es la misma.

Epigénesis

La elaboración de objetos mentales mediante la configuración de grafos neuronales deberá considerarse dentro de la dinámica de desarrollo del individuo. Es ahí donde intervienen los mecanismos de la epigénesis.

Se supone que durante el periodo en que se desarrolla el cerebro, es decir, la infancia, la red neuronal se modifica en forma considerable. Nacen algunas células, pero otras mueren. Algunas conexiones desaparecen y otras se forman. Los conos de crecimiento de las neuronas actúan, en consecuencia, como cabezas detectoras que buscan la mejor conexión. Ese emplazamiento de los circuitos neuronales constituye el resultado del aprendizaje. Entre todas las conexiones posi-

bles, el cerebro joven selecciona las que utilizará, y deja morir las que no le sirven. Aprender es eliminar, dice Jean Pierre-Changeux. De este modo se produce una verdadera selección natural darwiniana a través del uso: las más útiles sobreviven, las otras mueren.

Hay observaciones terribles que corroboran este hecho. Un niño a quien se le venden los ojos durante sus dos primeros años quedará ciego toda la vida.[7] Un niño perdido en la selva, encontrado a la edad de 12 años (como caso de Mowgli) jamás podrá aprender a hablar.[8] Así, el aprendizaje resulta decisivo para la formación del cerebro, y es esencial para su mantenimiento en buen estado. Se comprende la importancia fundamental de la enseñanza, incluida la de los niños, pues es en las primeras etapas de la infancia y la juventud cuando el cerebro forma sus conexiones neuronales. En el célebre debate entre lo innato y lo adquirido es posible afirmar hoy un día que, sin hacer a un lado el papel de lo innato, lo adquirido resulta fundamental.

Cognética

Se comienza, así, a comprender a la vez por qué las drogas actúan sobre el cerebro, cómo se forma el pensamiento abstracto y la importancia del aprendizaje. Se conocen también numerosos detalles sobre los procesos específicos de adquisición de la información.

Por ejemplo, los mecanismos de la vista están sumamente desbrozados. Se sabe que el ojo ve tres colores, azul, rojo y verde (¡no ve el amarillo!); que fabrica tres imágenes y las combina a continuación; pero también se sabe que su aprehensión de las formas es sumamente sutil, con una apreciación de las graduaciones y sobre todo con procedimientos de reconstrución cruzados sumamente precisos y eficaces, acompañados, como ya vimos, de un verdadero cálculo paralelo. Se comprueba que la exploración del sistema visual en general progresa rápidamente, ya que es mucho menos denso, mucho más simple, mucho menos flexible que la corteza.

Gracias al trabajo de Michel Jouvet,[9] el sueño libera también sus secretos. Ahora se sabe que dormir es indispensable tanto para el hombre como para el gato: sin sueño, los dos mueren. Este periodo es utilizado por el organismo para eliminar todas las toxinas creadas por esa gran fábrica química que es el cerebro. Se sabe que el sueño se

[7] Es lo que sucede, por ejemplo, cuando el cristalino es opaco en el momento del nacimiento (ambliopía funcional). En la actualidad se sabe que se requiere operar rápidamente al niño que sufre este padecimiento.

[8] En la actualidad se han cuestionado estos ejemplos "clásicos".

[9] Michel Jouvet, Le Sommeil et le Rêve, París, Odile Jacob, 1992.

divide en periodos de sueño verdadero (en los que el cerebro trabaja al mínimo, lo cual se comprueba eléctricamente), y en periodos de sueño falso (o sueño paradójico), durante los cuales el cerebro funciona, y se sueña. El sueño es la formación autónoma de objetos mentales, de grafos sintéticos; por ello no hay nada sorprendente en que se tengan sueños realistas y otros fantasiosos. Se comprende también que cuando uno se despierta de un sueño paradójico, el despertar sea fácil; pero al contrario, cuando uno "rompe" el sueño profundo, se levanta uno con el pie izquierdo.

Frente a todos esos descubrimientos, no resulta asombroso que se haya intentado hace simulaciones del cerebro, ya que al no poder interpretar el cerebro como una computadora, se intenta construir una computadora inspirándose en el cerebro.

Subrayemos en primer lugar que las computadoras paralelas o, todavía mejor, "masivamente paralelas", cuentan sin duda alguna con una arquitectura inspirada en el cerebro. Sin embargo, la similitud acaba ahí, pues, como las demás computadoras, éstas ejecutan un programa, poseen memoria pasiva, etc., en suma, están gobernadas desde el exterior.

Otros intentos que resultan más interesantes son las redes neuronales. Los físicos especializados en la física estadística han intentado adaptar sus métodos para abordar el estudio del cerebro: construyeron redes, las dotaron de leyes de cálculo para combinar las señales que hacen circular en ellas, y estudian su comportamiento con métodos estadísticos. Por lo pronto, los resultados son intelectualmente interesantes, pero nada más.

Más prometedor es el proyecto de Hopfield, que consiste en construir una computadora neuronal con reglas de funcionamiento que pretenden simular las de las neuronas. Se ha creado así un conjunto de rizos que calculan de manera colectiva, por aproximaciones sucesivas, con lo que se trata de lograr un acuerdo entre las tendencias contradictorias de las diferentes partes de la red, sin ninguna programación anterior. La computadora de Hopfield logra resultados sorprendentes, muy superiores a los de la computadora clásica, en áreas como el reconocimiento y la clasificación.

Todos estos esfuerzos forman parte de un movimiento más general, encaminado a reunir todas las ciencias cognitivas en torno a los conceptos de redes neuronales y funcionamiento cerebral. En este marco, a las ciencias biológicas del cerebro se unen, por una parte, las ciencias humanas y, por otra, las ciencias de los sistemas.

Las ciencias humanas se ocupan del cerebro por medio del estudio de sus manifestaciones: la psicología, desde luego, y en particular la

psicología infantil, que tiene como telón de fondo las magníficas observaciones de Piaget; la lingüística, que mediante el estudio de la diversidad de las lenguas dentro de la gran tradición de Benveniste y Jakobson, se desprende del grillete chomskiano. Y por último, la sociología: ¿acaso las sociedades no son superredes neuronales formadas por la asociación de millares o millones de cerebros que intercambian información? La psicología social se convierte desde este punto de vista en un paso obligatorio entre el estudio del individuo y el del grupo. ¿No se traslapan los objetos mentales colectivos —modas, creencias, mitos y religiones— con la formación individual de los objetos mentales? Como afirmaba Claude Lévi-Strauss, cuando la etnología se convierta en una ciencia, no será más que un capítulo de la biología. ¿Asistiremos al surgimiento de una verdadera ciencia del hombre en torno al estudio del cerebro? Y la historia, al menos en sus fundamentos, ¿no se interesa por esta evolución? Por el sesgo de la historia de las mentalidades, claro está, pero también en su esencia misma, por la decodificación de los mensajes históricos, por las relaciones que establece con la supermemoria neuronal, con la memoria colectiva. Por otro lado, todas las ciencias que se ocupan de la transmisión de señales, del tratamiento de la información, pueden aportar elementos importantes a este crucero multidisciplinario. Las ciencias físicas del orden y de la organización jerarquizada de la materia ¿irán a utilizar sus técnicas para el estudio del cerebro?

¿Nacerá tal vez a partir de ello una nueva ciencia: la cognética?

Evolución neuronal

Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, de estas investigaciones y progresos, no sabríamos nada del cerebro si no se lo ubicáramos en su contexto natural: el de la evolución biológica. El cerebro del hombre no es una máquina cableada y programada por un Dios y transportada bruscamente a la Tierra. Se trata del producto de una evolución muy larga durante cuyo transcurso la transmisión de señales eléctricas por medio de los nervios apareció muy pronto. Existen en las medusas —uno de los metazoarios más arcaicos, que apareció hace 500 millones de años— neuronas especializadas con sinapsis, y en los planarios, gusanos primitivos, se da una reagrupación de células que forman un protocerebro del cual parten los nervios hacia las diferentes regiones del cuerpo. Naturalmente, el cerebro y el sistema nervioso se desarrollan cada vez más a medida que se avanza en la evolución, hasta alcanzar su pleno desarrollo en los vertebrados.

El cerebro de los vertebrados cuenta con tres unidades: el cerebro frontal, el cerebro medio y el cerebro posterior, que se comunican con el resto del cuerpo por medio de la médula espinal. El olor se comunica al cerebro frontal, la vista se transmite al cerebro medio, y el sonido a la parte posterior del cerebro.

A lo largo de la evolución crece el tamaño del cerebro y, con él, la parte que coordina, es decir, la corteza. Como la histología nos indica que la densidad de neuronas es casi la misma sin importar el tejido, se tiende a pensar que la inteligencia se incrementa con el tamaño del cerebro. Se trata de un asunto difícil y controvertido. Numerosos estudios han demostrado una correlación positiva entre el tamaño del cerebro y el peso del cuerpo.[10] Así, se ha establecido que la ballena y el elefante tienen cerebros más grandes que la rata. Esta correlación, sin embargo, no es uniforme. Si en una gráfica logarítmica se define una recta media en la que aparezcan la rata, el lobo, el león y el elefante, es posible trazar rectas paralelas arriba y abajo. Abajo se encontrarán los peces, el cocodrilo, el avestruz: los menos "inteligentes" de la media. Arriba se encuentran el chimpacé, el hombre y el delfín. Pero lo que distingue al hombre de todos los demás es la rapidez de su evolución. El cerebro del delfín ha aumentado poco a poco durante 100 millones de años; el del hombre adquirió su volumen en 4 millones de años. ¡En un millón de años cuadriplicó su volumen! Sin embargo, es menos voluminoso que el del hombre que vivió hace 300 000 años. ¿Por qué? Debido a la posición bípeda. Sí, pero ¿cómo?

La histología comparada nos enseña que, en el transcurso de esta evolución, las neuronas también han evolucionado y se ha desarrollado la red neuronal. Se comprueba que la corteza cerebral, el centro de coordinación, aumentó también en importancia. ¿Cuál es el mecanismo que ha realizado todo esto? Se sabe que la herencia de caracteres adquiridos ha sido refutada y que, en el desarrollo del cerebro, los genes no lo son todo. ¿Entonces? Queda sin duda mucho que aprender para comprenderlo.

Lo que parece claro es que, a partir de cierto estadio de evolución, las cualidades cerebrales se convirtieron en factores fundamentales de selección natural. De este modo, se estableció un maridaje entre el germen, único responsable de la herencia y las mutaciones, y el soma, responsable de la selección. Este maridaje es el que produjo el surgimiento del cerebro humano, lejos, muy lejos de la computadora,

[10] De hecho, la mejor correlación se presenta entre el peso del cerebro y la superficie del cuerpo. El valor de estos estudios, si tienen alguno, es estadístico. No se puede concluir nada preciso al comparar, como se ha hecho, el tamaño del cráneo de Cromwell con el de Anatole France.

incluso de la computadora neuronal. Toda teoría sobre el cerebro tendrá necesariamente que incorporar el "hecho evolutivo".

Desde que se anunciaron estos progresos en el estudio del funcionamiento del cerebro, se inició un falso debate entre los que yo llamaría "espiritualistas" y los "materialistas". Los primeros tomaron la ofensiva, al calificar como "bárbaros" a los segundos.

Pongamos en claro algunos puntos. El hecho de saber que el cerebro funciona por medio del mecanismo electroquímico del impulso nervioso, que la aparición de determinada emoción se traduce en la emisión de determinado neurotransmisor o que la combinatoria neuronal genera grafos neuronales, no significa para nada que los científicos "reduzcan" el pensamiento a una mecánica. Como todos y cada uno de nosotros, los científicos piensan, aman, odian. También admiran la extraordinaria producción neuronal que constituye el pensamiento, y simplemente tratan de descifrar sus mecanismos. Pero se oponen a considerar que las ideas, los conceptos, sean entidades inmateriales que "flotan en el aire", sin ningún soporte físico. Nada confirma el concepto platónico de la naturaleza de las ideas. Esto no significa, en ningún caso, negar la actividad física y sobre todo lo que puede ser esencia primordial de la vida: el sueño y la creatividad. Todo lo contrario.

XII. LA DERROTA DE PLATÓN

Al terminar esta cabalgata al galope por los caminos de la ciencia en el siglo XX, es tiempo de hacer un alto, de echar un vistazo hacia atrás para sacar algunas conclusiones. Más allá de la embriaguez del descubrimiento y del vértigo frente a la riqueza de nuestros nuevos conocimientos, no es ocioso interrogarnos acerca de la naturaleza misma de la ciencia tal como la percibimos en nuestros días: sus contenidos —que valdría la pena comparar con los de principios de siglo—, sus ritmos, las trayectorias de su desarrollo.

En este enfoque, que por momentos lindará con la epistemología, no hemos tratado de hacer el trabajo de un filósofo, a falta de competencia y quizá también de gusto. Tan sólo hemos querido destacar algunos hechos notables tal como los percibe la "mirada interior". Siendo actor y espectador de la aventura científica, conozco bien sus reglas, sus códigos, sus realidades ocultas bajo las apariencias.

Cuando se trata de abarcar este panorama en su conjunto, la primera impresión que se tiene es la extraordinaria riqueza de los descubrimientos que ha aportado nuestro siglo y, junto con ellos, la renovación de nuestros conceptos más arraigados.

VIDA, MATERIA, QUÍMICA

El misterio de la vida comienza a revelar sus secretos. Los mecanismos de la evolución imaginados por Darwin encuentran una explicación molecular. Estamos en posibilidad de manipular el genoma, estamos a un paso de poder fabricar seres vivos mediante síntesis. ADN, ARN mensajero, enzimas, código genético, genoma y genes homeóticos son los elementos de la semántica que describe la nueva ciencia.

Al fin es posible abordar sobre bases racionales el estudio del funcionamiento del cerebro, y, a partir de él, aprehender los mecanismos de la cognición y la creación, sea artística o intelectual. Las fronteras entre ciencias naturales y ciencias humanas se borran. La cognética anuncia una nueva era para una ciencia del hombre en el sentido completo del término.

También la materia va entregando sus secretos poco a poco. Su estudio en la escala de los átomos y las partículas elementales nos llevó a des-

cubrir el mundo de lo microscópico, en el que reina la mecánica cuántica. De este modo se revelaron fenómenos extraordinarios que han transformado la vida de todos los días, revolución que se tradujo también en una semántica moderna —transistores, lásers, superconductores, reactores nucleares, quarks...—, que conforma otra visión de la naturaleza.

El denominador común entre la biología moderna y las nuevas ciencias de la materia es la química. Ignorada, descuidada durante mucho tiempo y a veces incluso despreciada, en la actualidad se presenta como una disciplina cardinal: el reino de la combinatoria creadora. No sólo los mecanismos fundamentales de la vida, la Tierra o el Cosmos están ligados a esta disciplina, sino que además ella genera el nuevo mundo, sus materiales inéditos. Gracias a la química, se multiplican los prodigiosos poderes de la física: superconductores a temperatura ordinaria, semiconductores nuevos, polímeros o cristales líquidos. Gracias a ella la biología explota sus descubrimientos en beneficio nuestro: medicinas, enzimas, vacunas, fotoquímica que permite nuevas fotosíntesis... Promesas de ayer que hoy se han vuelto realidades.

Historia

Esta dualidad de las leyes de la materia y de la vida se reubica a partir de entonces en una perspectiva histórica sólida y documentada. El surgimiento del hombre, el origen de la vida, el de la Tierra, la formación de la materia o el nacimiento de nuestro universo se integran en un calendario cósmico preciso. Tenemos un conocimiento de la historia natural que viene a completar el de la historia humana. Pero al mismo tiempo hemos tomado conciencia del carácter histórico de muchas disciplinas científicas. Desde luego la biología, donde sabemos desde Darwin que nada puede comprenderse fuera del contexto de la evolución; la astronomía y la geología, cuya esencia misma es explorar nuestro pasado; pero también las ciencias de la materia. La relatividad general de Einstein[1] rompió con la idea de un universo estacionario y reubicó así a toda la física en una evolución, una historia. No obstante, sólo poco a poco se cobró conciencia de que la materia tiene una historia, de que esta historia está inscrita en los átomos, en sus composiciones isotópicas. Desde entonces todas las ciencias de la materia —de la física de las partículas elementales a la química— tuvieron que integrar esta dimensión histórica.

[1] Cabe recordar que el propio Einstein, asustado por esa perspectiva, había inventado la "constancia cosmológica" para evitarlo. "Error" que después lamentó y afortunadamente, corrigió el padre Lemaître.

CONTINGENCIA

Ya se trate de la química del cosmos, la química de la Tierra, la química de la vida, la historia del universo, la historia de los planetas o la historia de la vida, en todos estos anales —referentes a la materia o a la vida— gobierna la contingencia. Nada indica una programación de ningún tipo, un libreto inevitable, un recorrido previsto. La Tierra es un accidente de la historia del cosmos, lo mismo que el surgimiento del hombre. El sentido de la historia no es más que una ilusión *a posteriori,* como lo es la supuesta teoría antrópica.[2] Nada en el estudio científico de los hechos permite entrever un determinismo histórico de ningún tipo, ni en la evolución de la naturaleza ni en la de la sociedad.

COMPLEJIDAD

En todas las disciplinas o especialidades se abren paso conceptos que parecen universales, que parecen comunes a todas las divisiones de las ciencias. Estos mensajes, cuyo surgimiento percibimos sin medir siempre toda su extensión, son múltiples:

—La muerte del reduccionismo estrecho (simplista, directo). Es cierto que el conocimiento de lo infinitamente pequeño es determinante, pero no basta para comprender lo macroscópico. El conocimiento del mineral no explica por sí solo los fenómenos geológicos, del mismo modo que la célula de la bacteria no contiene la explicación del elefante.

—El orden no es importante más que en su relación con el desorden. La simetría sólo tiene interés al romperse, pues el orden perfecto es estéril. Puede ser una culminación, un fin; nunca es un inicio creador. Las estructuras sólo nacen a partir del desorden de situaciones fuera de equilibrio. Esto es válido para el cristal, cuyos defectos son verdaderos tesoros para la tecnología; para el animal, cuyo crecimiento permanente impide la muerte; o para la montaña, que nace de las colisiones entre continentes. Sólo las revoluciones, los desequilibrios o los desórdenes permiten el surgimiento de nuevas estructuras.

—Más importantes aún parecen las leyes de organización universales, las jerarquías de escalas. ¿Cómo se ensambla un ser vivo a partir de un montón celular para dar como resultado un todo organizado?

[2] Se trata de una idea propagada por algunos físicos, según la cual, desde el momento en que se produjo el Big Bang, la aparición del hombre era inevitable. Su razonamiento es digno de las películas de los hermanos Marx cuando hacen correr al revés una película.

¿Cómo "se organiza" para fundirse o vaporizarse en un instante preciso? ¿Cómo se ensamblan las estrellas en galaxias y las galaxias en ejemplares?

Todos estos aspectos quedan comprendidos en las leyes de una materia desordenada, en los genes homeóticos, las redes neuronales, las estructuras fractales... La ciencia de la organización de los sistemas naturales, aún en gestación, reunirá en un todo coherente los argumentos del antiguo reduccionismo y los principios de simetría, pero en una visión jerarquizada, evolutiva.

—La combinatoria genera la variedad, pero no obedece únicamente a las leyes del azar. La combinatoria está hecha de ensamblajes de elementos simples, pero no de manera sistemática: todo está en su arquitectura. Aun cuando los sistemas estén compuestos de miles de millones de átomos, de células o de neuronas, su comportamiento no es ni meramente aleatorio ni totalmente determinado. Vivimos en un mundo no estadístico sino seudoestadístico.[3] El enfoque puramente estadístico resulta inapropiado, y el del "azar puro" ha quedado rebasado. La pseudoestadística rige la distribución de los elementos químicos en la Tierra tal como rige las redes neuronales o la química supramolecular.

El descubrimiento de la teoría o de la física del caos muestra matemáticamente de qué manera una ecuación bien definida genera un comportamiento pseudoaleatorio. El rizo queda cerrado. "El azar estaba allí para ocultar nuestra ignorancia", pero ésta ha comenzado a disminuir. Los límites entre el mundo aleatorio y el mundo determinado se borran. ¿Hasta dónde? ¿El mundo de lo infinitamente pequeño cabrá algún día en el harén determinista?

—Detrás de todo esto hay un gran cataclismo: el derrumbe de las reglas intuitivas, naturales, que los griegos nos habían legado: la proporcionalidad entre la intensidad de las causas y la magnitud de los efectos. Estas relaciones, que los matemáticos llaman lineales, parecen hoy en día limitadas para comprender el mundo. Hay que aceptarlo, vivimos en un mundo no lineal. La recta (o la exponencial) no gobierna la naturaleza; las curvas fractales son la regla. La complejidad del comportamiento puede ser resultado de pocos factores, pero que no se combinan de manera lineal. Éste es el mundo nuevo que se anuncia; un mundo en el que la complejidad o la previsión a largo plazo están vedadas, y donde la adaptación rápida, la flexibilidad es la única actitud válida. Estamos muy lejos del mundo determinista y de la ciencia "triunfalista" del siglo XIX. Y sin embargo, ahora sabemos mucho más.

[3] Esto es lo que Boltzmann ya había comprendido cuando inventó la física estadística, que es en realidad una seudoestadística.

NATURALEZA Y ARTEFACTO

Junto con una abundancia de conocimientos nuevos y una renovación a fondo de los conceptos fundamentales, la ciencia contemporánea ofrece también características nuevas en su objeto de estudio. Durante mucho tiempo las ciencias tuvieron como objeto el descubrimiento de las leyes de la naturaleza. Mientras tanto, los ingenieros —y no los científicos— fueron quienes fabricaron nuevos objetos: los artefactos.

En cierta forma, éstos eran productos de la ciencia, pero en el siglo XX se modificaron las relaciones entre ciencia de la naturaleza y ciencia del artefacto. Ésa fue una de las aportaciones fundamentales del periodo reciente. Durante mucho tiempo se distinguió entre ciencia pura y aplicaciones de la ciencia, distinción en la que a menudo se sobreentendía la existencia de una jerarquía. Esta distinción entre el saber y lo útil en términos de ciencia se remonta a los griegos, como demostró claramente Jacques Blamont.[4] El siglo XIX no escapa de esta diarquía pese a que numerosos sabios, de Faraday a Poincaré pasando por Pasteur, consideraron un deber "aplicar" ellos mismos sus resultados "científicos" a "cosas útiles".

Durante la segunda mitad del siglo XX esta concepción se altera por completo. De la pila atómica a la ingeniería genética, pasando por el transistor, muchos descubrimientos fundamentales se han realizado en laboratorios industriales. Algunos productos tecnológicos han sido elementos determinantes para la revolución científica, entre ellos el microscopio de efecto túnel de Binning, los rayos X de Von Laue, el espectrómetro de masas de Aston o la microsonda electrónica de Cartaing, sin olvidar, desde luego, el artefacto que domina y opaca todo por su omnipotente presencia: la computadora. El artefacto en sí mismo se ha convertido en un objeto fundamental de la investigación, ya se trate del láser, de las cerámicas superconductoras, de las pilas atómicas, de los transistores, de las computadoras o de las supermoléculas. Un fenómeno digno de mención es que el hombre debe descubrir las propiedades de estos "objetos" que inventa. Por ello la frontera entre investigador científico e ingeniero en investigación se borra, como también se cuartea la barrera que separa ciencia y tecnología, investigación individual e investigación en equipo.

Cuando Pierre Gilles De Gennes trabaja con las propiedades de las gomas y las gotas, o con el frotamiento, ¿está haciendo investigación fundamental o tecnológica? No importa mucho: está enriqueciendo nuestros conocimientos. Este fin del siglo XX presenció un acerca-

[4] Jacques Blamont, *Le Chiffre et le Songe*, París, Odile Jacob, 1993.

miento sin precedentes entre descubridores e inventores, que permite esbozar el futuro de un mundo científico "fabricado", en donde la combinatoria creadora garantiza un desarrollo y una diversificación casi eternos.

Los ritmos del descubrimiento

Volvamos la vista ahora a los ritmos del progreso científico, tal como acabamos de vivirlos.

El filósofo Thomas Kuhn propuso describir la evolución de la ciencia como una alternancia entre periodos de crisis —las revoluciones durante las cuales nacieron los nuevos modelos unificadores, a los que llama paradigmas—, y periodos más tranquilos, donde estos paradigmas se imponen y luego se desarrollan. Según él, el detonador de las revoluciones científicas son ciertos grupos de investigadores, escasos y localizados. Por el contrario, los desarrollos posteriores implican una comunidad científica amplia y muy dispersa.

Este esquema formulado por Kuhn con base en todos los desarrollos de la física, ha resistido admirablemente la difícil prueba de fines del siglo XX. Su "modelo" se aplica tanto a la mecánica cuántica, la biología molecular, la teoría atómica, la tectónica de placas, la nucleosíntesis, el Big Bang, el caos o las redes neuronales, como a la computadora numérica. En todos los casos, se pueden identificar claramente los periodos de creación: 1927-1930 en el caso de la mecánica cuántica, 1953-1958 en el del ADN; 1965-1968 en el de la tectónica de placas, 1965-1975 en el de la nucleosíntesis, 1970-1980 en el del caos. En todos ellos, el impulso proviene de ciertos lugares precisos: Munich, Copenhague y Gotinga en el caso de la mecánica cuántica; París, Cambridge, Harvard y Caltech en el de la biología molecular; Cambridge y Princeton en el de la tectónica de placas, Caltech, Cambridge y Harvard en el de la nucleosíntesis; París, Cornell y Santa Cruz en el del caos, etc. El periodo de surgimiento es difícil, pero al final desemboca en la participación general de la comunidad, de manera que, después de ese punto, resulta muy difícil seguir sus pasos.

Otra idea de Kuhn que ha resistido notablemente la prueba de los hechos es la que postula que las nuevas ciencias "cristalizan", se vuelven autónomas cuando aparecen los famosos paradigmas. Éstos son o bien teorías o bien métodos de estudio específicos, cuya virtud consiste en reunir en torno a ellos ideas, disciplinas y teorías hasta entonces dispersas. Tienen la virtud de suscitar a la vez movimientos unificadores y nuevas investigaciones; son a la vez gérmenes de cristalización y fermentos.

El ADN es un paradigma para la biología molecular; la tectónica de

placas lo es para las ciencias de la Tierra; el enlace químico para la química; el caos, el microcircuito numérico, la nucleosíntesis o las redes neuronales desempeñan este papel en su campo respectivo. De hecho, los progresos extraordinarios de la ciencia de fines de nuestro siglo son en gran parte el resultado del florecimiento, aquí y allá, de dichos paradigmas.

Podemos agregar a la teoría de Kuhn que este "modelo", aplicado a lo que podría llamarse paradigmas de primer orden, es válido en todas las escalas. Los paradigmas de primer orden generan paradigmas de segundo orden, que a su vez generan lo que podría llamarse ideas más o menos importantes. De este modo, el láser no es un paradigma de la misma amplitud que la mecánica cuántica, pero toda la óptica cuántica se fundó y agrupó en torno a esta idea-artefacto. La teoría de la regulación celular es sin duda menos importante que la estructura de la doble hélice del ADN, pero es un paradigma que funda la biología celular. La teoría de las fuerzas de los enlaces químicos de intensidad variable es menos englobadora que la teoría atómica; no obstante, precisamente ella permitirá el auge de la química moderna. Y así podríamos, a partir de cada paradigma secundario, diversificar aún más. Casi me siento tentado a hacerlo hasta el nivel del equipo de investigación, el cual sólo se vuelve eficaz cuando ha encontrado su o sus propios paradigmas aglutinadores (provisionales).

En relación con los ritmos que imponen el descubrimiento, el surgimiento y el desarrollo de todos estos paradigmas, podemos afirmar que son homotéticos. Por ello me siento tentado a sugerir, no sin cierto humor, que la teoría de Kuhn posee una estructura fractal...

Algo que Kuhn no podía prever y que caracterizó el fin del siglo XX fue que el ritmo de los descubrimientos se aceleraría hasta el grado de sumergir a algunas comunidades en un ambiente de "revolución permanente". Pero no debemos pensar que la ciencia se construye con base en grandes rupturas, en descubrimientos fulgurantes, y que el resto no es sino "la ocupación de Renania". La conquista del saber, la embriaguez del descubrimiento vibran cada día en todo el mundo, a veces de manera deslumbrante y repentina, a veces de manera discreta, subterránea y progresiva, pero no menos importante. Esto también es parte de la "fractalización" de la teoría de Kuhn.

EL SURGIMIENTO DE LAS IDEAS NUEVA

Es verdad que la concepción e invención de los paradigmas es difícil, pero su surgimiento y su aceptación no lo son menos y resultan igual-

mente decisivos. Cabe recordar el caso de Wegener, cuya teoría de la deriva de los continentes, básicamente exacta, fue brutalmente "reprimida". Éste es también el caso de Mendel, a quien se despreció olímpicamente durante 70 años. Recuerdo las burlas de los caudillos de la "biología sorbonesca" a propósito de Jacques Monod en la época del desarrollo de la biología molecular, y el desafortunado juego de palabras que se atrevían a hacer abiertamente sobre el tema.[5] Me acuerdo, como si fuera ayer, de la batalla que debimos librar unos cuantos en Francia para que se impusiera la tectónica de placas.

Toda idea nueva es perturbadora; por ello es natural que se le combata, y con mayor fuerza entre más original sea. El progreso científico "conveniente" debe ser "diferencial", gradual, progresivo; debe proceder paso a paso. Si es brutal, cuántico, resulta molesto y como tal es tratado.

¿Pero quién determina la verdad de una teoría, de un descubrimiento? La comunidad científica, es decir, el conjunto de los que participan en el proceso de creación del saber, esos a los que antes se acostumbraba llamar los "sabios" y cuya convicción es a fin de cuentas el factor determinante.

La ciencia es así un juego curioso donde los jugadores y los árbitros son los mismos individuos.[6] Y el comportamiento de esta comunidad se apega con bastante fidelidad a la teoría propuesta por René Girard[7] para las sociedades humanas en general, teoría que resumiremos ahora adaptándola al caso particular de la ciencia.

Según Girard, hay un conflicto permanente entre individuo y grupo. Por un lado, el individuo trata a toda costa de singularizarse, de innovar, de afirmarse; por el otro, el grupo al que pertenece siente fobia por los particularismos, aplica el principio de *mimesis*. El grupo debe ser homogéneo y sus miembros deben ser lo menos "particulares" que sea posible. Esto es lo que desea el grupo.

Partiendo de esta base, las relaciones entre las dos entidades, las dos escalas de organización, obedecen a fenómenos de umbral. Cuando el individuo innovador es demasiado original, cuando lo que propone es demasiado diferente de lo que hace y piensa la mayoría del grupo, se le excluye, se le "sacrifica"; es el "chivo expiatorio". En cambio, si sólo es un poco diferente de los demás, el grupo lo imitará, lo seguirá, y al mismo tiempo lo trivializará y cooptará. Puede incluso convertirlo más tarde en un líder o un jefe.

[5] En el anfiteatro, hablaban de "biología monocular" [T.: haciendo un juego de palabras con el apellido de Monod], frase que, en mi época de estudiante, me parecía estúpida y ofensiva. Ese ejemplo me marcó.

[6] Lo que, en el mundo moderno, abarca a muchs personas.

[7] R. Girard, *Des choses cachées depuis la fondation du monde*, París, Grasset, 1978.

Todas las peripecias de los descubrimientos científicos pueden analizarse utilizando este esquema. Desde luego, esta actitud posee el mérito de "filtrar" todas las ideas extravagantes, las falsas experiencias, los múltiples errores, ya que para hacer un descubrimiento no basta con ser "original"; se requiere además que este descubrimiento responda a los criterios de exactitud y de "verdad objetiva" propios de la ciencia.

De todo lo anterior se pueden obtener algunas conclusiones. La primera es que la calidad de un innovador científico consiste en tener rigor y sentido crítico frente a su propio trabajo, pero también valor intelectual para defenderlo. En primer lugar el valor para ir más allá de los propios prejuicios, el propio saber, y luego el de enfrentarse a la incredulidad e incluso la hostilidad o la indiferencia de los colegas,[8] ya que es muy difícil innovar en medio del consenso. Esto no significa que se deba aceptar publicar lo que sea; pero es conveniente vigilar que la *mimesis* no sea un freno para la idea fructífera.

Inventar rigurosamente y convencer: tal es el díptico indispensable al que está sometido cualquier científico. El éxito no está garantizado ni en una ni en otra fase.

La ciencia inmersa en la Historia

El hecho de que sea la comunidad científica la que crea y acepta la ciencia, inserta a ésta en un contexto intelectual y un "modo" determinados.

La teoría atómica, propuesta desde hace mucho, fue rechazada por la mayoría de los químicos del siglo XIX. La física estadística, demasiado precoz, fue combatida. Y podemos mencionar muchos otros ejemplos más perturbadores, pues una idea "exacta" en una época determinada, puede no ser en la época siguiente:

—Cuando Lyell combate la teoría de las catástrofes de Cuvier en el siglo XIX y triunfa, es una suerte para la geología. Si se hubiera impuesto la teoría de las catástrofes, la geología de esta época se habría enredado en una serie de explicaciones fantasmagóricas incontrolables y no habría edificado un cuerpo de doctrina riguroso, basado en la observación. Sin embargo, ahora sabemos que las grandes catástrofes evolutivas existen, y la brusca desaparición de los dinosaurios se convirtió en su emblema.

[8] Recomiendo la lectura del artículo de Michel Biezunski, "Einstein à Paris", en *La Recherche en histoire des Sciences,* 1983.

—Cuando Lamarck habla por primera vez de la evolución, tendrá razón a pesar de la opinión de todo el *establishment*. Pero se equivocará años más tarde cuando afirme que la herencia de los caracteres adquiridos es el mecanismo responsable de la evolución.

—Cuando Bethe y von Weizsacker explican el funcionamiento del Sol mediante el ciclo nuclear del carbón, dan un paso histórico pues, en efecto, la teoría cuantitativa del funcionamiento de una estrella se apoya en el principio de reacción nuclear. No obstante, hoy en día sabemos que la reacción nuclear esencial en el Sol es la fusión del hidrógeno en helio.

—Cuando Pasteur demuestra la falsedad de la "generación espontánea" tiene razón y su demostración dará origen a la microbiología. Sin embargo, ahora sabemos perfectamente que hace 4 mil millones de años la vida debió aparecer "espontáneamente" a partir del mundo mineral...

De manera que nada hay más falso que la descripción de la historia científica como una sucesión de descubrimientos claros, definidos, que se suceden lógicamente unos a otros como la construcción de un templo programado por el "Gran Arquitecto". La ciencia se parece más a la travesía de una selva por la que uno se abre camino con un machete y donde a veces se tiene fortuna de descubrir un claro, un poco de espacio que se podrá franquear rápidamente en línea recta.

El desarrollo de la ciencia está, desde luego, anclado en la historia. El siglo XVII fue el de las matemáticas. El XIX presenció el desarrollo de la mecánica y luego de la física clásica. El inicio del siglo XX fue el del desarrollo de la física microscópica.

La segunda parte del siglo XX es sin duda alguna la de la biología, de la química, de la geología, de la astronomía, de la física natural: es decir, de las ciencias naturales. Vemos desarrollarse así a las ciencias por orden de dificultad creciente. Al mismo tiempo, cuando una ciencia ya no progresa por innovaciones, tiende a axiomatizarse, a racionalizarse. Así, si vemos los desarrollos históricos reales de la mecánica o de la física clásicas, fueron tan "caóticos" como podemos comprobar con nuestros ojos, que han sido los de la ciencia moderna. Sin embargo sus presentaciones actuales nos parecen homogéneas y lógicas por efecto de la "presbicia moderna".

La alternancia fecunda

Cuando examinamos de cerca cómo se ha elaborado el conocimiento científico —y este fin del siglo XX nos ofrece una muestra de riqueza incomparable— podemos decir que, sin excepción, ha sido por alter-

nancia entre la observación y la experimentación, por un lado, y la teoría y el modelo, por el otro.

Éste fue el caso de la física clásica: de Newton a Maxwell pasando por Young, Fresnel o Faraday, todos los físicos eran experimentadores y teóricos a la vez. Fue el caso en la física cuántica, que se originó en los experimentos de Rutherford y las mediciones de espectroscopía óptica, pero se desarrolla también gracias a los modelos de Bohr y de Schrodinger. También sucedió así en la biología, como lo señalan François Jacob o Peter Medawar, y en la química, la astronomía o las ciencias de la Tierra... Todos los progresos realizados en estas disciplinas son consecuencia de la alternancia entre observaciones y teorías.

Sin un modelo teórico, una observación o un experimento carecen de significado. Contrariamente a lo que creían los naturalistas ingenuos, no hay una ciencia objetiva que se contente con describir y clasificar los objetos hasta que esa acumulación acabe por desembocar "automáticamente" en una síntesis teórica. Observemos, observemos —solían decir—, el resto no es más que especulaciones invisibles y por ello dudosas, y se oponían a la biología molecular o a la tectónica de placas. Precisamente con ese tipo de argumentos, los "poderosos químicos" del siglo XIX rechazaron el concepto de átomo.

Escuchemos más bien a François Jacob:[9] "Es perfectamente posible examinar un objeto durante años sin jamás sacar la menor observación científica de él [...]. En el trabajo científico, la teoría siempre tiene la primera palabra. Los datos experimentales sólo pueden reunirse y lograr significado en función de ella".

Pero, por otro lado, sin observación, sin experimentación, la teoría no sirve de nada. Contrariamente a la idea común, la ciencia sólo es deductiva en trechos muy cortos. "El objetivo último de la física es describir la naturaleza y prever sus fenómenos, lo que es imposible partiendo de teorías *a priori*. Al cabo de unos pasos, llegaríamos a un callejón sin salida, y cada error, añadiéndose a los anteriores, nos alejaría del camino correcto", escribe el Premio Nobel italoestadunidense Emilio Segré.

En forma aún más perentoria, uno de los más grandes físico-matemáticos de todos los tiempos, Henri Poincaré, escribió: "La experimentación es la única fuente de la verdad: sólo ella puede enseñarnos algo nuevo; sólo ella puede darnos certidumbre. Nadie puede poner en duda estas dos afirmaciones".

Desde luego, el desarrollo teórico, sobre todo cuando se apoya en el poder de razonamiento que ofrecen las matemáticas, brinda una satisfacción intelectual, una especie de embriaguez en la que se cae

[9] *Cf. Le Jeu des possibles*, París, Fayard, 1981.

fácilmente. ¿Acaso descubrir los misterios del mundo mediante el solo poder de la mente no era el sueño platónico que obsesionaba a todos los teóricos, y que Einstein traducía mediante el célebre aforismo: "Quiero conocer el pensamiento de Dios; el resto no son más que detalles"? Si embargo, hasta ahora esto ha sido una vana ilusión.

El trabajo científico impone una regla de oro que lo distingue de todas las mitologías o todas las religiones: la necesidad de demostrar la teoría mediante la observación. Una teoría científica no es nunca una verdad revelada *a priori;* contiene lo que llamamos la búsqueda de la "verdad objetiva" (sin que esta palabra esté bien definida, por cierto).[10]

El Azar, lo Imprevisto

Sin embargo, si describiéramos la marcha de la ciencia como la alternancia pura y simple entre la experimentación y la teoría, estaríamos desvirtuando la realidad histórica. Estaríamos maquillándola, arreglándola, haciendo un trabajo revisionista en beneficio de los racionalistas a ultranza. Porque el tercer elemento esencial del trabajo científico es el azar, lo imprevisto, que desempeña un papel esencial en el progreso y que, para disfrazarlo mejor, suele designarse con un vocablo más anodino: "contingencia". Esta afirmación puede parecer tan chocante para algunos que deberá ser cuidadosamente matizada.

El descubrimiento de los rayos x por Roentgen, que revolucionó la cirugía y tuvo consecuencias tan importantes en la exploracion de la materia, se debió a un simple azar. Roentgen hacía experimentos con los tubos de vacío (lejanos ancestros de nuestras modernas luces de neón); al poner un metal frente a uno de los electrodos y enrollar el tubo en un papel negro, se encontró con la sorpresa de ver el esqueleto de su mano proyectado sobre una pantalla fluorescente situada cerca de ahí. Este "descubrimiento" desató otro, también debido al azar: el de la radioactividad, por Becquerel. ¿Cuál era la probabilidad de que un mineral de uranio quedara cerca de una placa fotográfica y, al mismo tiempo, pudiera velarla? Este descubrimiento, sin embargo, se convirtió en el punto de partida de toda la física moderna. Penzias y Wilson, quienes trabajaban para Bell System y observaban el cielo, no tenían la menor idea de la teoría del Big Bang; sin embargo descubrirían la "radiación fósil" del universo a 3 grados K, y le darían toda su gloria. ¿Quién hubiera pensado que al colocar un magnetómetro atrás de un barco para elaborar mapas del campo magnético, los geofísicos

[10] *Cf.* Jacques Monod, *Le Hasard et la Nécessité,* Seuil, 1973.

marinos de los años sesenta pondrían en evidencia la expansión de los fondos oceánicos? El descubrimiento del neutrón en 1932, ¿no es el fruto de la explotación que hizo Chadwick de un experimento de los Joliot realizado con un fin totalmente distinto? ¿Y el descubrimiento de la penicilina por Fleming?

No obstante, para que el azar se vuelva un elemento del progreso científico hace falta algo más. Como dice Pasteur, que sabe de lo que habla: "El azar sólo favorece a las mentes preparadas", a quienes saben transformar el azar en oportunidad.

Es importante reconocer el papel que desempeña el azar, si queremos definir convenientemente las cualidades de un investigador. Las más decisivas son la flexibilidad de la mente, el rechazo de cualquier tipo de dogmatismo y la sujeción absoluta a los hechos, lo que equivale a aceptar, como ya hemos dicho, la superioridad de lo real sobre cualquier otra idea preconcebida, a aceptar el criterio de objetividad de una observación o la validación de un experimento por otro investigador que trabaje en las mismas condiciones.

La incorporación del azar como factor del progreso científico nos permitirá profundizar en el dualismo experimentación-teoría.

Observación y experimentación

Se dice a veces que la experimentación es un estadio de desarrollo científico más elaborado que la observación. Yo creo que se trata de dos conceptos distintos, no sustituibles ni jerarquizables. La observación es más general que la experimentación. Se extiende tanto a las ciencias experimentales, como a aquellas que jamás podrán reproducir en laboratorio la mayor parte de los fenómenos que estudian, por ejemplo la astronomía, las ciencias de la Tierra o la ecología (o, desde otra perspectiva, la economía o la sociología). Para hacer más objetivo su trabajo, los especialistas de estas ciencias multiplican sus observaciones sobre objetos idénticos. No olvidemos nunca que en la explotación de lo imprevisto, el elemento que transforma el azar en oportunidad es la observación; cuando se hace de manera minuciosa, atenta, guiada por algunos puntos de referencia teóricos, sólo ella permite identificar un fenómeno nuevo, imprevisto, y sacarle provecho.

En este marco, la experimentación puede ser considerada como una observación organizada. Puede ser exploratoria o confirmatoria y constituye, en consecuencia, un paso mucho más "racional" que la observación y también mucho más deductivo. Una y otra, cabe repetirlo, son importantes aunque sean diferentes.

Modelo y matemáticas

En lo relativo a la teoría, suele confundirse a menudo "modelo" y "expresión matemática". Muchos modelos, sobre todo en ciencias físicas, acaban por expresarse en lenguaje matemático, pero esto no significa que las matemáticas constituyan la esencia de ningún modelo. "Explicar un fenómeno es considerarlo como el efecto visible de una causa oculta ligada al conjunto de las fuerzas invisibles que supuestamente rigen el mundo", dice Emilio Segré. Construir un modelo es construir una abstracción simple que explique la complejidad aparente. El objetivo fundamental de la modelización es, así, el paso de la observación de la naturaleza a la conceptualización. La teoría, por su parte, "tiene como objetivo dar un orden coherente a un conjunto de ideas que han sido o serán confrontadas mediante la experimentación", dice Abragam durante su célebre debate con el matemático Thom.[11] La expresión matemática, así, no es más que la fase última de la modelización. Estas afirmaciones, hechas por físicos eminentes,[12] se ven reforzadas considerablemente cuando consideramos las demás ciencias de la naturaleza. La biología molecular construye teorías y modelos cuya abstracción no tiene nada que envidiarle a la física, pero a pesar de las numerosas tentativas que se han hecho, prácticamente no recurre a las matemáticas. Los paradigmas de la química moderna no utilizan más que matemáticas elementales. La tectónica de placas nunca se ha expresado en forma de ecuación (hasta en su forma topológica, lo cual hubiera sido posible).[13] Un teórico no es un manipulador de ecuaciones: es alguien capaz de elaborar modelos explicatvios abstractos a partir de lo concreto. Confundir abstracción y matematización es signo de una perversión intelectual.

Además —y es quizá la prueba absoluta de esta distinción—, en las ciencias, el modelo está condenado a ser provisional. Si algún día se vuelve obsoleto o falso, no será porque contenga un error de cálculo sino porque ya no corresponderá a las observaciones o a los experimentos. Ya no pasará la prueba de lo real.

[11] R. Thom y A. Abragam, Académie des Sciences, *La Vie des Sciences*, tomo 2, núm. 1, pp. 59-68.

[12] A las que hemos añadido a H. Poincaré, A Einstein, F. Dyson, R. Feynman, S. Weinberg, etcétera.

[13] Y fue intentada por René Thom, quien llegó a resultados fantasiosos.

MATEMÁTICAS Y NATURALEZA

Todo esto nos lleva a preguntarnos acerca de las matemáticas y de su papel en las ciencias de la naturaleza.

Como ya se habrá observado, no las hemos mencionado como tales entre los componentes de la ciencia. No ha sido un olvido: las matemáticas no constituyen una ciencia propiamente dicha ni son, en todo caso, "una ciencia como las demás". El físico teórico Murray Gell-Mann, uno de los mayores admiradores de esta disciplina, escribe: "Las matemáticas no son en realidad una ciencia, si por ciencia se entiende una disciplina dedicada a la descripción de la Naturaleza y de sus leyes".

Como quedó de manifiesto en el debate entre Jean-Pierre Changeux y Alain Connes, la naturaleza de los "objetos matemáticos" es una interrogante. Para Changeux se trata de meros productos del cerebro humano, de "objetos mentales", como podría ser el lenguaje. Para Connes, las matemáticas tienen una existencia objetiva, independiente del cerebro humano. Esta última concepción es compartida por numerosos matemáticos, aunque solamente por ellos (y quizá uno que otro físico-matemático). Todos los demás científicos son de la opinión de Jean-Pierre Changeux, empezando por mí.

¿Es concebible que la idea de plantear raíz $\sqrt{-1} = i$ y de desarrollar números complejos a partir del álgebra sea una propiedad intrínseca de la Naturaleza, flotando en el Universo desde hace 5 mil millones de años? ¿No es más válido admitir que se trata de una idea inventada por Jérôme Cardan y Raffaele Bombelli en el siglo XVI, un mero producto de la mente humana? ¿No es más razonable pensar que el concepto de "vector" es un invento astuto para presentar fenómenos u objetos que necesitan varias "cualidades" para poder ser definidos? La teoría de los grupos ¿no es un invento genial y muy fructífero, al igual que las matemáticas en general?

Evidentemente, aunque sean una construcción mental, las matemáticas —disciplina de las formas, los números y las relaciones— hunden sus raíces en lo real. La geometría nació de la observación de las figuras geométricas que existen en el mundo real.[14] Inventariarlas, clasificarlas y descubrir sus propiedades es un trabajo idéntico al de la física pues, una vez definidas, esas leyes (el teorema de Pitágoras, por ejemplo) pueden confrontarse con la observación de lo real. Pero cabría preguntarnos si sucede lo mismo cuando se desarrollan geometrías

[14] Véase Michel Serres, *Les Origines de la géométrie*, París, Flammarion, 1995.

abstractas, multidimensionales o particulares, como la de Lobachevski, que estipula que por un punto se pueden hacer pasar varias paralelas a una recta dada, o la de Riemann, geometría esférica de tres dimensiones, u otras todavía más abstractas, como la de Hilbert (pese a que más tarde puedan resultar útiles en física).

En el caso de los números se plantean los mismos problemas. Es verdad que los enteros positivos corresponden a una realidad casi física. Pero pasó mucho tiempo para que se descubriera la existencia del cero. Los números irracionales aparecen claramente en las propiedades de la naturaleza: π en las propiedades del círculo, radical $\sqrt{2}$ en la diagonal del cuadrado, el número de oro que se encuentra en la distribución de los pétalos de algunas flores, el número de Feigenbaum, que ya vimos a propósito de la teoría del caos, etc. ¿Pero acaso la teoría de los números no es más que una construcción intelectual elegante y con grandes capacidades, como pensaban los matemáticos Kronecker y, más tarde, Peano?

Las matemáticas siguen efectivamente un procedimiento original. A partir de algunas premisas (procedentes de lo real), la mente humana inventa, imagina, construye y deduce lógicamente un corpus de conocimientos: "Para mayor gloria del espíritu humano", como diría Dieudonné. De este modo obedecen la regla de todas las construcciones abstractas de nuestro cerebro, que consiste en utilizar al principio "imágenes" mentales tomadas de la naturaleza para construir después imágenes abstractas.[15] Así es como proceden la música y la pintura abstracta o la novela de ficción; todas ellas "primas" de las matemáticas, construcciones neuronales majestuosas.

Contrariamente a las ciencias de la naturaleza, las matemáticas no se desarrollan por un vaivén entre observación y modelo teórico. Las matemáticas puras constituyen una "ciencia particular". No son para nada *la* ciencia de referencia, como suele creerse en Francia.

Su relación con lo real es innegable. Históricamente, las matemáticas nacieron de lo real, y durante mucho tiempo (hasta principios del siglo XX), matemáticas y física permanecieron íntimamente ligadas. Algunos matemáticos, y no de los menos importantes (en especial de la gran escuela rusa), piensan que cuando las matemáticas "se acercan" a lo real adquieren un nuevo vigor. Pero lo que se discute es la naturaleza de esa relación con lo real. Las matemáticas son como un bosque: las raíces de los árboles se hunden en lo real, pero éstos se desarrollan creciendo hacia el cielo, sin regresar a lo "real".

Para integrar las matemáticas en un esquema científico más clásico,

[15] Véase el capítulo XI.

algunos matemáticos imaginaron que los objetos matemáticos serían reales, flotarían en el universo, como lo sostiene Alain Connes. La "realidad" de estos objetos matemáticos estaría basada en criterios como el rigor, la elegancia, la simetría, la belleza, criterios tan válidos, afirman, como la observación o la experimentación.

¿Verificar numéricamente un teorema no sería un experimento tan "real" como una verdadera experimentación? "Para ellos, los objetos matemáticos poseen una 'realidad' distinta de la realidad sensible (quizá muy parecida a la que Platón concedía a sus 'ideas')", escribe Dieudonné. Esta visión bastante platónica. Según Platón, las ideas —lo bello, la verdad, el bien— son anteriores al hombre y flotan en el Universo, por lo que sólo podemos descubrirlas y contemplarlas.

Lo que provocó la confusión fue haber introducido la verdad como criterio, pues ¿qué es lo verdadero? De hecho, lo que distingue a la ciencia de la naturaleza de las matemáticas es su relación con el criterio de realidad. Las ciencias deben obedecer el principio de realidad, es decir, superar victoriosamente las pruebas de observación de la realidad (ateniéndonos, claro está, a nuestros medios sensoriales e intelectuales de observación). Las matemáticas, por su parte, obedecen solamente al principio de coherencia.

Las matemáticas son así una actividad intelectual específica, que mantiene relaciones unívocas con lo real, lo que las distingue de las ciencias de la naturaleza, que se desarrollan mediante relaciones de intercambio, de diálogo con la realidad, relaciones biunívocas. En cuanto a los matemáticos en sí, puede distinguirse entre los que admiten que las matemáticas son una construcción mental —a los que suele llamarse "constructivistas"—, y los matemáticos metafísicos, que se consideran a sí mismos discípulos de Platón.[16]

La herramienta matemática

Una cuestión distinta —e igual de interesante— es la de saber qué papel desempeñan exactamente las matemáticas en el desarrollo de las ciencias de lo real como herramienta científica.

Es indudable que las matemáticas han influido de manera decisiva en los avances de toda la física teórica, sea clásica o cuántica, y que constituyen el lenguaje de ésta.[17] En el periodo reciente intervinieron de manera esencial en las teorías de las partículas elementales, la teoría de la información y las cuestiones relativas al caos. Lo sabemos, y

[16] Estos matemáticos se califican a sí mismos como "realistas". Nosotros los llamaríamos más bien "metafísicos". En Francia son una gran mayoría.

sin embargo, si nos detenemos más nos damos cuenta de que su papel principal se relaciona más con la formalización que con el surgimiento de nuevas ideas. Henri Poincaré lo subraya cuando escribe, hablando de la "biblioteca de la ciencia": "La física experimental se encarga de las adquisiciones, sólo ella puede enriquecer la biblioteca. En cuanto a la física matemática, tendrá como misión elaborar el catálogo". Einstein dice lo mismo de otro modo: "Todo conocimiento de la realidad proviene de la experiencia y remite a ella". Y nadie podrá acusar ni a uno ni a otro de que no les gusten las matemáticas...

En lo que se refiere a las demás ciencias, hoy en día tan importantes (biología, química, astronomía, ciencias de la Tierra o ciencias de la computación), está claro que las matemáticas han desempeñado un papel menor en sus extraordinarios avances recientes.

En resumen, puede decirse que las matemáticas constituyen el lenguaje de la física pero no son su esencia, y que su papel es menor, por no decir secundario, en las etapas creadoras de las demás ciencias.

El papel de las matemáticas en las ciencias de lo real podría resumirse en la metáfora siguiente: son hermosos automóviles destinados a recorrer el "campo" de la ciencia; cuando este "campo" es una carretera bien señalizada, permiten ir lejos y rápido; cuando es un desierto inexplorado (sin datos experimentales), pueden ayudar a conducir la exploración rápidamente, pero no sustituyen a la brújula (la intuición); cuando se trata de una selva intrincada (demasiados datos de observación complejos y enredados), se detienen a la orilla, impotentes.

Ése es el papel de las matemáticas como auxiliares de las ciencias de la naturaleza: importante, a veces decisivo, mas no fundamental. ¿Significa que las matemáticas están destinadas a convertirse sólo en un lenguaje? Cuando se conocen las relaciones entre los progresos en la computación y los de la biología moderna, ambos ciencias cibernéticas pero que tienen también como característica común el haber mantenido a las matemáticas en el límite de sus desarrollos, podemos preguntarnos acerca de lo que será el futuro de esta nueva distribución de roles.

IDEAS FALSAS Y *HOLD-UP* PLATÓNICO

Estas exploraciones nos permiten regresar al problema esencial, que es el de la naturaleza de la ciencia. Todo lo que acabamos de decir

[17] Eugene Wigner escribió un artículo sobre la eficacia sorprendente de las matemáticas en las ciencias naturales. Emilio Segré, por su parte, explica que esta adaptación tal vez sólo sea buena en algunas ramificaciones que por eso se han vuelto predominantes. Los problemas que no se pueden tratar matemáticamente siguen en la sombra.

sobre la evolución del conocimiento científico nos permite en efecto rechazar una idea por desgracia muy difundida entre nosotros sobre la naturaleza del método científico. En general se cree que este trabajo se basa en una lógica deductiva que permite ir de los descubrimientos a las hipótesis y de las hipótesis a los descubrimientos. Según dicha lógica, la ciencia es racional, su emblema está constituido por las matemáticas y cada ciencia debe tender a acercarse a ella. Esta idea fue propagada por John Stuart Mill y en torno a ella se desarrollaron y propagaron muchas concepciones tan lógicas como falsas, como la que afirma que cada ciencia sigue esta sucesión de fases: observación/experimentación/teoría matemática. Esta última fase culminaría en la elaboración de una teoría "científica" coherente y predictiva, y a partir de ahí la ciencia podría desarrollarse de manera deductiva, pues la experimentación sólo desempeñaría un papel de control. Esta filosofía, donde "la mente prevalece sobre la Naturaleza", donde la idea se impone a lo real, dio origen a la célebre clasificación de las ciencias de Auguste Comte, para quien sólo las matemáticas y la física teórica tenían derecho a recibir el nombre de ciencias completas, pues la biología y la química estaban consideradas como ciencias inferiores, por no poseer una sistematización matemática.

Esta visión deformada encuentra su justificación en las presentaciones axiomáticas que se hacen de una ciencia *a posteriori*. Por razones de lógica, de estética y también de economía intelectual, los "profesores" no han dejado de hacer cada vez más didáctica y matematizada la presentación de las grandes teorías.

Hablando de esta axiomatización "pedagógica", Richard Feynman,[18] orfebre en la materia, escribe: "Dicho sea de paso, lo que acabo de contarles, es lo que llamo la 'historia de la física según los físicos', la historia tal como ellos se la cuentan... y que es siempre falsa. Es una especie de saga convencional que los físicos le cuentan a sus alumnos, los cuales a su vez se la contarán a sus alumnos, y así sucesivamente. Ésta no tiene necesariamente mucho que ver con el desarrollo histórico de la física".

De hecho, por medio de una sucesión de pensadores herederos de Platón, que van de Descartes a Auguste Comte, se ha desarrollado, sobre todo en Francia, la idea de que en el desarrollo científico la abstracción es más importante que la observación y la experimentación, que el razonamiento deductivo supera al procedimiento inductivo. A esta escuela de pensamiento, que adoptó las matemáticas como emblema, es a lo que llamamos "escuela platónica". Se ha apo-

[18] *Lumière et matière, une étrange histoire*, InterÉditions, 1987.

derado de la enseñanza de las ciencias y, con ello, de la imagen que tenemos de la ciencia, realizando así un verdadero *hold-up* intelectual. Así es como las matemáticas y su modo de razonamiento han invadido la enseñanza de las ciencias y toda la formación intelectual de los científicos.

Las ciencias han sufrido las consecuencias, así como las matemáticas mismas pues al estar alejadas de lo real, no han desempeñado plenamente su papel, ni en el plano cultural ni en el plano estético.

Ciencias humanas

Una ilustración interesante de esta falsa visión de lo que es el trabajo científico la constituyen algunos desarrollos de las ciencias humanas. En un primer periodo, muchos especialistas en esas ciencias nacientes, deseando tal vez adquirir una legitimidad científica, tomaron dos actitudes típicamente platónicas: adoptar teorías generalizadoras, compactas, por un lado, y matematizar sus procedimientos de investigación, por otro.

Un ejemplo de la primera actitud puede verse en la influencia extraordinaria que han tenido Marx y Freud sobre un elevado número de intelectuales franceses que afirman ser científicos humanos. Pero ha sido mucho más profunda su influencia, según muchos lo han expresado, en su deseo de pertenecer a una escuela de pensamiento compacta, completa, "terminada" (en el sentido matemático del término). La personalización de las escuelas, así, ha acentuado aún más su carácter dogmático total y exclusivo.

La segunda actitud ha consistido en utilizar las matemáticas a toda costa; va de la aplicación de la teoría de los grupos para formalizar las estructuras de parentesco en Lévi-Strauss, hasta la moda de la historia cuantitativa, pasando por la utilización del coeficiente intelectual en psicología, las estadísticas de palabras en lingüística, o incluso de la gramática generativa de Chomsky.

Se ha comprobado que el desarrollo de las ciencias humanas sólo comenzó en verdad cuando éstas se alejaron de esos dos "espejismos" seudocientíficos, cuando desarrollaron sus propios métodos apoyándose en metodologías originales y específicas. Está claro en el caso de la historia, sobre todo con la introducción de la historia de las mentalidades; en el de la sociología, con la influencia de las ideas de psicología social y estudios estructurales; también es válido, desde luego, para la antropología y comienza a serlo para la lingüística.

Si Marx o Freud dijeron cosas importantes en sus respectivos cam-

pos (yo creo que sí), es evidente que hay que referirse a ellas pero no como un todo, como una globalidad indivisible. Es indispensable que ningún campo del pensamiento se deje encerrar en una "doctrina completa" que tenga respuestas para todo a partir de un dogma. Asimismo, es posible utilizar las matemáticas para ciertas cosas en las ciencias humanas y obtener buenos resultados (por ejemplo, en el análisis factorial), pero no constituyen ni un objetivo ni un medio exclusivo de practicar las ciencias humanas.

No obstante, hay una ciencia humana que ha perseverado en la actitud "platonicista": la economía. Obstinadamente basada en postulados, ha resumido sistemáticamente a la formalización matemática. Así esta ciencia, nacida de la realidad, se ha alejado continuamente de ella. Al mismo tiempo, se ha apresurado a dictar reglas que supuestamente reflejan los "automatismos" de los sistemas económicos. Encerrada en la falsa idea de que existen "leyes de la economía" tan universales como las "leyes del mundo físico", que podrían aplicarse tanto a la economia papúa como a la de la España medieval y al Japón moderno, esta disciplina se ha alejado de lo real y, en consecuencia, del desarrollo científico. Deseosa de asociarse prematuramente al gobierno de la ciudad, esta ciencia engañosa, que debía haberse limitado a la esfera del intelecto, ha permeado nuestras sociedades. Así, una disciplina fascinante, que debía estar en la encrucijada de las ciencias humanas, entre la historia, la evolución tecnológica, la sociología y la psicología, se ha marchitado en la imitación estéril de las ciencias abstractas, pese a los esfuerzos de los más lúcidos, que por desgracia son minoría.[19]

Combinatoria, síntesis e imaginación

Después de mostrar que la ciencia progresa por una alternancia irregula entre la experimentación (observación) y la modelización, alternancia en la que se inmiscuye el "azar fecundo", y después de echar por tierra la ilusión platónica, nos gustaría terminar con el examen de lo que es la creatividad científica.

En el núcleo del trabajo científico está, repitámoslo, el paso de lo concreto a lo abstracto, de la observación al modelo. La creatividad interviene en el nivel de la concepción del modelo. "La investigación

[19] De hecho, esta desviación es percibida por los mejores economistas que, o bien se repliegan hacia la microeconomía o la teoría de los azares de los mercados financieros, o se concentran en tareas concretas de macroeconomía, como el proyecto "Made in America", dirigido por Robert Solow.

científica comienza siempre con la invención de un mundo posible o de un fragmento de mundo posible", señala Peter Medawar. Con ello quiere decir que la imaginación desempeña un papel central en el desarrollo científico: imaginar un concepto capaz de reunir varios hechos científicos, imaginar un experimento para probar una idea o una teoría —imaginación es la palabra maestra del progreso científico— que consista en perfeccionar un modelo simple para explicar un mundo aparentemente complicado y enredado.

Esta fase de creatividad es resultado siempre de una combinatoria. Se conjuntan dos (o varias) observaciones (experiencias), dos ideas, dos teorías, para hacer surgir una nueva. Esta conjunción sólo se convierte en creación si supera las distancias o las contradicciones aparentes que se oponen *a priori* a cualquier acercamiento. En este mecanismo ditinguiremos dos modalidades que se oponen no en términos de métodos, sino en cuanto a la finalidad.

Por un lado, la "conjunción" lleva a construir un modelo que abarca las dos "ideas madres"; se realiza entonces una verdadera síntesis. Así, cuando Maxwell conjunta magnetismo, electricidad y luz en el mismo concepto de ondas electromagnéticas, lleva a cabo una creación por síntesis. Cuando los químicos comprenden que átomos y mléculas no son conceptos concurrentes sino complementarios, llevan a cabo una creación sintética.

A la inversa, algunas combinatorias generan nuevos conceptos que van más allá de las dos ideas iniciales. Se trata entonces de una verdadera fecundación, que da origen a un nuevo concepto autónomo. Cuando Watson y Crick conjuntan las ideas moleculares de helicidad del ADN de Pauling y de reproducción cromosómica de Weismann para proponer la estructura en doble hélice, crean un concepto nuevo que posee determinadas propiedades en sí mismo y que además dará origen a la biología molecular.

De este modo podemos decir que los progresos del conocimiento se logran mediante una doble combinatoria: la primera, "reductora", permite la economía de pensamiento, en tanto que la otra, creadora, conduce a una diversificación de la ciencia. Casi podría decirse que los progresos de la ciencia pueden ser descritos mediante la alternancia de estas dos pulsiones. Una encierra el abanico del conocimiento al mostrar su convergencia; la otra lo abre al dar origen a un nuevo mundo. Pero en esta marcha no hay nada sistemático, programado, "lógico". Todo es no lineal, discontinuo, pseudoaleatorio, fractal. Nunca, pero nunca, la combinatoria científica consistirá en encontrar un "justo medio" entre dos teorías contradictorias. Cuando dos teorías se enfrentan, si cada una reposa en argumentos sólidos, una y otra

serán aplicadas en los campos en que den buenos resultados... hasta el momento en el que se encuentre una idea que permita reunirlas o superarlas. La ciencia no progresa mediante la elaboración de "conglomerados intelectuales" ni por unificación ficticia. No abandona nunca una teoría hasta que otra está madura para sustituirla, aun cuando sepa que un día deberá dejarla atrás, pues se han descubierto sus límites.

Así es como avanza la ciencia: sin verdades reveladas, progresando con rigor pero en medio de la incertidumbre hacia una verdad relativa; buscando construir con obstinación representaciones del mundo coherentes y que pasen la prueba de la observación.

EPÍLOGO
¿QUÉ PASARÁ EN EL SIGLO XXI?

LA CIENCIA MODERNA transmite dos mensajes: uno se refiere a sus contenidos; el otro, a la manera en que se ha desarrollado. Los primeros, como hemos visto, nos enseñan que las leyes que rigen al mundo son las de la complejidad, la combinatoria, la variedad. El desarrollo, por su parte, ejemplifica el papel fundamental que han tenido en ella la contingencia, lo imprevisto, la adaptación exitosa frente a la novedad.

En todo esto, no hay nada que se parezca, de cerca o de lejos, a la búsqueda de ideas preexistentes que flotan en el Universo y que serían descubiertas gracias únicamente a la fuerza de la mente y su poder deductivo.

Esto explica por qué las matemáticas y su rigor abstracto sólo han tenido un papel menor en los descubrimientos sucesivos que han permitido la construcción de la ciencia moderna. A medida que se avanzaba en la exploración de la complejidad —de la mecánica a la biología— su papel se fue reduciendo cada vez más.

Sin embargo, este hecho no se tomó en cuenta en la enseñanza de las ciencias en Francia. El razonamiento deductivo lógico se presentó como el arquetipo de la ciencia, y las matemáticas siguen siendo su disciplina emblemática. Esta visión domina todo desde el siglo XIX y se ha reforzado con el tiempo. Poco a poco ha convertido a las matemáticas "puras" en el medio de selección de nuestras elites, no sólo de los alumnos de las grandes escuelas sino también, de manera aún más sorprendente, de nuestros médicos y, a través de las clases C de los liceos, de todos nuestros "buenos alumnos", ¡incluso los que van a literatura! [T]

Más aún, la axiomática ha servido como modelo para exponer las demás disciplinas científicas —desde la física hasta la economía e incluso, a veces, las ciencias de la naturaleza—, haciéndoles al mismo tiempo perder su elegancia, su flexibilidad, su riqueza y hasta su esencia. Este contrasentido profundo tiene múltiples consecuencias.

La selección mediante las "matemáticas puras" aleja de la ciencia a muchos estudiantes que se interesan por lo concreto, lo real, pero que no se sienten atraídos por las matemáticas, sobre todo por su carácter axiomático. Al mismo tiempo, sacamos a la ciencia del dominio de la

cultura por lo que muchos estudiantes, marcados por lo que padecieron con las matemáticas, se alejan definitivamente del quehacer científico.

En el caso de los que aprueban esta selección y que no seguirán el camino de las matemáticas, el resultado no es mejor. En primer lugar, casi todos ellos tienen una visión falsa de las ciencias, y tenderán a practicarlas con un rigor extremo, sin una mente flexible. Para los que continúen por el camino de la ciencia ello implicará una reconversión mental o un fracaso.

En cuanto a los demás, en particular los que están destinados a asumir cargos de responsabilidad, esta selección los habrá formado en las certidumbres de la mente, mas no les habrá enseñado a enfrentarse a lo concreto con la flexibilidad necesaria para adaptarse a ello.

Las matemáticas son una disciplina espléndida que debería ocupar un lugar en el patrimonio cultural de todos; constituyen también un lenguaje científico poderoso y útil, pero no son —no nos cansaremos de repetirlo— el arquetipo de la ciencia. Su abstracción las convierte en disciplinas no centrales sino, al contrario, periféricas con respecto a las ciencias que estudian lo real. Preparar a los científicos mediante las matemáticas resulta tan extraño como preparar a los literatos con un examen de gramática.

Durante mucho tiempo, esta perversión intelectual se vio compensada en las clases dirigentes por la influencia que tenía la cultura literaria. Esta influencia ha ido desapareciendo, sustituida por una cultura económico-gestionaria cuyo estrabismo se dirige precisamente a las matemáticas, de manera que el espíritu geométrico ha ido eliminando el ingenio en nuestras clases dirigentes y, simultáneamente, ha desterrado de ellas la imaginación.

Como hemos dicho, en muchas disciplinas, incluso muy lejanas de las matemáticas, se han impuesto los enfoques dogmáticos y de una lógica impecable, llamados "pedagógicas". Estos enfoques imprimen poco a poco en las mentes jóvenes una visión mecánica del desarrollo científico, y al mismo tiempo destruyen con su imaginación potencial y sus tentativas de pensamiento heterodoxo. En Francia se venera el buen gusto, no el gusto nuevo; se construye un país de discípulos serios, trabajadores, eruditos, no de pioneros imaginativos y emprendedores. ¿Cómo sorprenderse entonces de que nos la pasemos corriendo tras las modas procedentes de Estados Unidos, ya sea en música o en cine, pero también a menudo en la ciencia?

En Francia estamos muy lejos de una formación que estimule la imaginación, el gusto por los riesgos, la capacidad de adaptación: el contacto pleno con lo real. Nuestra enseñanza no forma jóvenes de

espíritu científico; les enseña una disciplina abstracta, útil, para seleccionarlos. ¡Y todo esto, a los 20 años!

Y el principio mismo de esta selección precoz y escolar que caracteriza a nuestro "elitismo republicano" también ha sido destruido por la ciencia moderna. La aceleración de las innovaciones científicas y tecnológicas es relampagueante. Lo que se aprendía ayer en la escuela ha quedado superado hoy, tanto en sus contenidos como en su espíritu; y mientras los conocimientos de un médico son obsoletos en menos de diez años, los de un técnico en informática lo son en cinco.

La rapidez del cambio nos impondrá, voluntariamente o por la fuerza, un cambio radical en nuestras prácticas pedagógicas.

El objetivo de la enseñanza misma se modificará. Proporcionar bases sólidas (¿pero cuáles?), enseñar al alumno a trabajar solo, a adaptarse al progreso. Y, por encima de todo, enseñar a inventar, a innovar, pues nuestro país deberá adaptarse constantemente a los cambios del mundo, a la evolución del conocimiento.

La imaginación, la originalidad, consisten en aprender a enfrentarnos a lo real y adaptar a él la visión propia, las ideas propias. La mejor formación es el aprendizaje del método científico, la alternancia fecunda entre la observación de lo real y su teorización. Es también aprender a correr riesgos, a romper hábitos, a tener el valor de inventar.

Lo que actualmente se conoce como "pensamiento único", es decir, la imposibilidad de nuestras elites de inventar nuevas formas de sacar a nuestro país de la infernal espiral recesión-desempleo-decadencia en la que se ha sumido está allí, en el centro mismo de nuestro sistema de enseñanza.

En lugar de basar la selección en las matemáticas, en la capacidad de resolver problemas escolares formales que datan de hace dos siglos, deberemos seleccionar progresivamente a nuestras elites de acuerdo con su capacidad para adaptarse, inventar, imaginar.

Pero ¡cuánto trecho nos falta recorrer para pasar de una enseñanza arcaica a la enseñanza del futuro! El diagnóstico ya está hecho. La urgencia es evidente. ¿Pero aún hay remedio?

Si en la actualidad nuestros errores surgen a plena luz es, en mi opinión, por tres razones: la "geometrización" de las mentes de los dirigentes, que ha alcanzado un umbral inquietante, y la extraordinaria aceleración de la evolución del mundo, a la que evidentemente no hemos sabido responder. Además de todo esto, han aumentado de los competidores económicos (no se trata ya simplemente de alcanzar a Alemania o Inglaterra, como en los siglos XVIII o XIX), y, por último, tenemos los propios cambios en la naturaleza de la competencia mundal: de una competencia de productos materiales se ha pasado a la de

los productos intelectuales. El conocimiento, la cultura o la ciencia son parte medular de las bases del mundo moderno; por ello es normal que los defectos o deficiencias de nuestro sistema de educación, en especial la científica, se manifiesten de manera más notoria y determinante que nunca.

Tenemos aquí un ejemplo de los famosos fenómenos no lineales de los que tanto hemos hablado y que la sociedad moderna está descubriendo: un pequeño fenómeno se acumula y acaba por producir efectos importantes y súbitos.

Es necesario reformar nuestro sistema de enseñanza. Sin embargo, no podremos hacer nada en este sentido si no entendemos cómo llegamos a donde estamos. El origen de los males es profundo y antiguo; los remedios serán igualmente difíciles de aplicar.

Cuando, en el siglo XVI, la Sorbona rechaza el humanismo procedente de Italia y, con él, la física, las tecnologías y las ciencias de la naturaleza, está optando ya por la abstracción en contra de lo concreto, por el inmovilismo contra el movimiento. Decide basar su enseñanza en la trivada lógica-matemática-metafísica. Se trata de un primer gesto fundador que será difícil de borrar y que marcará a la universidad francesa durante mucho tiempo.

Como consecuencia, *a contrario*, dará como resultado la creación "extramuros" del Museo de Historia Natural y de las grandes escuelas (entre ellas el Politécnico). Estas dos creaciones tuvieron un gran éxito en sus inicios, a principios del siglo XIX. En el Museo, en torno a las ciencias naturales, se reúnen Lamarck, Cuvier, Geoffroy Saint-Hilaire, Haüy, Jusssieu. En el Politécnico, donde se forman ingenieros-matemáticos, es la época de Laplace, Lagrange, Arago, Carnot, Ampère, Fresnel, Clapeyron, Gay-Lussac, que marca el apogeo de la ciencia francesa. Insistamos en el hecho de que esos desarrollos se llevaron a cabo fuera de la universidad y mantuvieron a las ciencias de la naturaleza y a la física en instituciones distintas y periféricas. Cabe mencionar, además que éstas se quedaron fijas en las certidumbres que suele dar el triunfo: de allí su efímero éxito.

Después de 1870, se empieza a acusar a la universidad y a las escuelas de ser responsables del desastre militar. La República reclama sabios para hacer frente a Prusia y preparar la revancha. Pasteur no es el último en exigir una reforma profunda en la enseñanza.

Ésta se prepara, se proclama, desde la escuela primaria —escuela de la República bajo Jules Ferry—, hasta la Universidad, a la que hay que democratizar y renovar *ya*. Sin embargo, pese al innegable avance en la justicia social que traerán esas reformas, los contenidos de la ense-

ñanza siguen estando totalmente inspirados y dominados por el espíritu positivista que propagó Auguste Comte con su estúpida clasificación de las ciencias entre nuestras elites "laicas". Las matemáticas y la axiomática reinan en los programas de todos los niveles: en el liceo, la Sorbona o el Politécnico.

Henri Poincaré, del que no podría decirse que fuera "alérgico a las matemáticas", escribía desde 1910, para protestar contra ese dogmatismo generalizado: "Los ingleses enseñan la mecánica como una ciencia experimental. En el continente, se expone siempre más o menos como una ciencia deductiva y *a priori*. Desde luego, son los ingleses los que tienen razón, ¿pero cómo pudimos persistir durante tanto tiempo en el error?"

Cabe mencionar que este tipo de protestas fueron letra muerta y que todo continuó igual o con mayor fuerza. Al positivismo de Auguste Comte se agregó un "espíritu republicano" igualmente reductor, con ese invento universal pero que nadie nos ha pedido prestado: el *concurso formal*. ¿No es acaso el medio más equitativo, el más igualitario de promoción social? En este ejercicio, se piensa que nada sobrepasa en eficacia a las matemáticas (en rigor intelectual, pero también, y sobre todo, en facilidad de corrección). Esto es lo que De Gennes llama, en tono de burla, el "teorema del concurso".[1]

Así fue como el elitismo republicano imprimió la preeminencia de las matemáticas, es decir, el rechazo de lo real, en el corazón mismo del sistema educativo y, por ende, de todo nuestro sistema de selección.

¿Hace falta subrayar que somos el único país científicamente desarrollado que optó por este camino (además, tal vez, de los rusos)?[2]

Desde luego, todo esto no es ni fruto del azar ni una suma de las peripecias contingentes de la historia: es la traducción concreta de la historia de las mentalidades de un pueblo a la vez católico, realista, jacobino, napoléonico, que prefiere las certidumbres de la mente a las incertidumbres desconcertantes de lo real, que sólo evoluciona mediante sacudidas revolucionarias y que, no lo olvidemos, no ha sido preponderante ni en la conquista de los nuevos mundos en el siglo XVI ni en las revoluciones industriales sucesivas de los siglos XVIII y XIX.

Como vemos, las matemáticas sólo desempeñan en este asunto el papel de operadores, de símbolos pedagógicos de una tendencia secular, de una mente mística y mistificadora con la que podrían relacio-

[1] "Cada vez que se crea un concurso en una disciplina científica, dicho concurso se vuelve un ejercicio de matemáticas", en *Les Objets fragiles*, Plon, 1994.

[2] Sin sacar conclusiones simplistas, no es inútil dar más puntos de referencia. Si se contabilizan los premios Nobel de física y química, la distribución Estados Unidos/Europa era antes de 1914 de 2/31, entre 1914 y 1945 de 8/46 y, después de 1945, de 88/66. En lo relativo a Europa, Alemania suma 54, Gran Bretaña 44, Francia 18 y Rusia 7.

narse muchos episodios de nuestra historia intelectual (e industrial). La tarea de reinvertir esta tendencia, de dar paso a una enseñanza de las ciencias modernas que se apoye en el diálogo con lo real, capaz de estimular la imaginación, la creatividad, la flexibilidad intelectual, la confianza en el porvenir, no es un asunto menor. No se trata de ningún modo de eliminar las matemáticas como tales —actividad intelectual tan noble como la música, y herramienta científica eficaz—, sino de reubicarlas en su justo lugar. Se trata de afirmar que observar, describir lo real y luego aprender a pasar de lo real a la abstracción, iniciarse en las ciencias de la naturaleza como la biología, la geología, la química y, desde luego, la física (pero una física apoyada en la experimentación), es más importante que hacer malabarismos con una abstracción descarnada.[3]

Preparar el porvenir dejando atrás las inercias de nuestra historia es nuestro desafío, al entrar en un siglo XXI cuyos problemas serán ante todo tecnológicos y culturales. ¿Seremos capaces de librar las batallas económicas en torno a las grandes innovaciones tecnológicas? ¿Podremos resistir las presiones intelectuales y tecnológicas a fin de evitar una trivialización cultural procedente del exterior? La respuesta a estos desafíos no se halla ni en la política monetaria ni en automatismos económicos que no existen. En Francia se tiende a pensar que mediante la aplicación de tal o cual teoría, de tal o cual mecanismo económico se recuperarán los "grandes equilibrios". Esta visión es totalmente falsa y obsoleta. Vivimos en una época en donde los desequilibrios son permanentes, inmersos en una competencia mundial donde la innovación se convierte en el factor de supervivencia esencial. En un mundo descentralizado, ampliamente desestructurado, el fondo cultural de un país desempeña un papel capital. Dentro de éste, la cultura científica ocupa un lugar central, pues es el ámbito en que más rápido cambian las cosas. En nuestra opinión, esta adaptación depende en primer lugar de una renovación de nuestras enseñanzas.

La cuestión es simple; el desafío, inmenso. ¿Cómo enfrentar confiadamente el siglo XXI con enseñanzas basadas en contenidos que datan del siglo XIX y una visión superada de las ciencias? ¿Sabremos enseñar a nuestros hijos a imaginar el porvenir y enfrentarse a lo real sin encerrarlo en las ilusiones tranquilizadoras de lo abstracto? ¿Seremos capaces de producir una enseñanza de las ciencias que sea moderna, concreta, que se dirija a todos y sea capaz de poner a la ciencia en el centro de la cultura?

En un mundo el que surgen otros competidores, donde las viejas

[3] Es necesario agregar que la enseñanza de las propias matemáticas debe anclarse en lo concreto y dar la espalda a los errores de lo que se ha dado en llamar las matemáticas modernas.

culturas de Oriente, menos deterministas, se hallan tal vez mejor adaptadas a los nuevos saberes, ¿seremos capaces de prepararnos para el siglo XXI y el tercer milenio que se abren ante nosotros?

AGRADECIMIENTOS

La idea inicial de este libro debe mucho a Denis Jeambar, quien me pidió que escribiera una crónica científica en el semanario *Le Point*. Ése fue el punto de partida.

Este trabajo, que sabía que sería muy difícil, no habría podido llevarse a cabo sin múltiples colaboraciones de todo tipo. Los especialistas, desde luego, que evitaron los errores más evidentes. Los ingenuos, que leyeron pacientemente y me obligaron a hacer "comprensible" el texto (así lo espero) para todos. Por último, quienes releyeron todo con sumo cuidado: J.-P. Changeux, J. Audouze, F. Cuzin, E. Brézin, Bergé, M. Gouilloux, J.-L. Le Mouël, J.-P. Poirier, S. Robert, G. Manhès, L. Meynadier, C.-B. Allègre, V. Courtillot y C. Durand.

Agradezco también a aquellos y aquellas que hicieron posible la realización material de la obra: Jean-Claude Bossard, Sandra Jeunet, Mylène Anselme, Catherine Netter, Lydia Zerbib, Joël Dyon.

Naturalmente, asumo la total responsabilidad de las opiniones, errores u omisiones que hayan podido subsistir.

CRONOLOGÍA 1895-1986

1895 Descubrimiento de los rayos x por Roentgen.
1897 Descubrimiento de la radioactividad por Becquerel.
Descubrimiento del electrón por Thomson.
Creación del término "cromosoma" por Waldeyer, quien ya había creado el de neurona en 1890.
Sherrington descubre las sinapsis en el cerebro.
1900 De Vries, Correns y Tschemark confirman en forma independiente la validez de las leyes de Mendel. Es el inicio de la genética moderna.
1901 Hipótesis de los cuantos por Max Planck.
Garrot establece la existencia de una relación entre mecanismo de la reproducción y enzimas.
Identificación de las ondas sísmicas por Oldham.
1902 Leyes de la Radioactividad por Rutherford y Soddy.
De Vries utiliza el concepto de mutación hereditaria.
Aplicación de las leyes de Mendel al animal por Cuénot.
1903 Pierre Curie y Laborde muestran que la radioactividad desprende calor.
1904 Empleo de la adrenalina como neurotransmisor por Elliot.
1905 Publicación de tres tesis de Einstein (relatividad restringida, efecto fotoeléctrico, movimiento browniano).
1906 Descubrimiento de las inversiones del campo magnético terrestre por Brunhes.
Descubrimiento del núcleo terrestre por Oldham.
1907 Primera datación de rocas por el método radioactivo de Boltwood.
1909 Definición del concepto de gen por Johannsen.
Cartografía de la corteza cerebral en 52 zonas por Brodman.
1910 Morgan demuestra la herencia de las mutaciones con la drosofila.
Descubrimiento de la pulsación de las Cefeidas por Miss Leavitt.
Teoría de la "deriva de los continentes" por Wegener.
1911 Clasificación de las neuronas por Ramón y Cajal.
Establecimiento del núcleo atómico y del primer modelo de átomo por Rutherford.
La superconductividad es descubierta por K. Onnes.
1912 Descubrimiento por Von Laue de la naturaleza ondulatoria de los rayos x y de su difracción por los cristales.
Publicación del libro de J. Perrin *Les Atomes.*
1913 Modelo de átomo de Bohr.
Descubrimietno de los isótopos por Thomson y Aston.
Primera computadora numérica por Vannevar Bush.
Primer diagrama Hertzsprung-Russell para clasificar las estrellas.

1916 Relatividad general por Einstein.
Teoría de los agujeros negros por K. Schwarzschild.
1917 Artículo sobre la emisión estimulada por Einstein.
1918 La valencia por los electrones que se comparten por Lewis.
Primera escala cuantitativa de las épocas geológicas por Barrell.
1919 Eddington confirma la relatividad general de Einstein gracias a un experimento en la isla de la Ascensión durante un eclipse solar.
Primera reacción nuclear por Rutherford.
1923 Descubrimiento por Von Hevesy de la posibilidad de utilizar la radioactividad para marcar las moléculas
La mecánica ondulatoria de L. de Broglie.
1924 Estadística cuántica de Bose-Einstein.
1926 Ecuación de Schrodinger. Nacimiento de la mecánica cuántica.
Experimento de Davisson y Gerner que confirma la dualidad onda-partícula postulada por De Broglie.
Estadística cuántica de Fermi-Dirac.
1927 Muller realiza mutaciones con ayuda de los rayos x.
Hipótesis del Universo en expansión por Lemaître.
Heitler y London hacen el primer estudio cuántico de una molécula, la de hidrógeno.
1929 Berger registra ráfagas de impulsos eléctricos en la superficie del cerebro.
Hubble presenta sus resultados sobre el alejamiento de las galaxias.
1930 Argand propone que el Himalaya nació de la colisión entre India y Asia.
Descubrimiento del neutrón por Chadwick.
El positrón de Anderson.
La radioactividad artificial de F. e I. Joliot.
1934 Las dislocaciones: Orowan, Polanyi y Taylor.
1935 Eyring y Polanyi proponen la hipótesis del estado activado para comprender la reacción química.
1938 La naturaleza del enlace químico es clarificada por Pauling.
Electrodinámica cuántica propuesta independientemente por Feynmann, Schwinger, Tomonaga y Dyson.
1939 Primera computadora binaria-electrónica por J. Atanassof.
Descubrimiento de la fisión nuclear por O. Hahn y L. Meitner.
1940 Nacimiento del grupo del fago con M. Delbrock y S. Luria.
1941 Hipótesis un gen-una enzima por Beadle y Tatum.
1942 Computadora Colossus de Turing.
Primera pila atómica construida bajo la dirección de E. Fermi.
1943 El ADN portador genético, por Avery, Mac Leod y Mac Carty.
1944 Publicación del libro de E. Schrodinger, *¿Qué es la vida?*
ENIAC II, primera calculadora moderna, es presentada por Mauchly, Eckert y Von Neumann.
1946 Descubrimiento por Lederberg y Tatum de la sexualidad de las bacterias.

Efecto transistor propuesto por Bardeen, Brattai y Shockley.
Dennis Gabor concibe la holografía.
George Gamow presenta la teoría del Big Bang.
1950 Descubrimiento del bombeo óptico por Kastler.
Univac i, primera gran calculadora electrónica.
Primer experimento sobre los mecanismos de las reacciones químicas a escala del microsegundo.
Descubrimiento de las reacciones químcas oscilantes de Beloussov y Jabotinski.
Descubrimiento por Pauling de la estructura en hélice de las moléculas grandes.
Hodgkin y Huxley explican la propagación electroquímica del influjo nervioso.
1953 La doble hélice por Watson, Crick y Wilkins.
Descubrimiento del *máser* por C. Townes.
Experimento de Stanley Miller y Urey sobre el origen de la vida.
1954 Runcorn desarrolla el paleomagnetismo y redescubre la deriva de los continentes.
Urey y Epstein inventan el termómetro geológico con los isótopos del oxígeno.
La teoría de los mecanismos inmunológicos por Jerne y Mac Farlane Burnett.
1955 Patterson establece la edad de la Tierra en 4.55 mil millones de años.
1957 El artículo fundador de la nucleosíntesis por Margaret y Geoffrey Burbidge, Fowle y Hoyle (será citado B2FH).
Explicación de la superconductividad por Bardeen, Cooper y Schrieffer.
1958 "Invento" del láser por C. Townes.
1959 Primer circuito integrado por Jack Kilby.
Primera computadora IBM de transistores.
1960 Descubrimiento del ARN mensajero por Monod y Jacob.
Descubrimiento de una fuente X en el cielo y de la fuente de los cuasares por el grupo de Caltech (Giacomo *et al.*).
1961 Modelo de los quarks por Gell-Mann y también por Zweig.
Propuesta de la expansión de los fondos oceánicos por Hesse.
1962 Primeros experimentos de reacciones químicas en la escala del nanosegundo.
Artículo de Lorenz sobre el "efecto mariposa".
1863 Descubrimiento de las moléculas interestelares por el grupo MIT.
1964 Mecanismo de creación de las imágenes durante la visión por Hubel y Wiesel.
Descubrimiento por Gast Tilton y Hedge de la heterogeneidad isotópica del manto terrestre.
1965 Descubrimiento por Penzias y Wilson de la radiación a 3° K.
1967 Descubrimiento de los pulsares por Hewish y J. Bell.
Síntesis de la vitamina B12 por R. Woodward.

Tectónica de placas por Dan McKenzie y Jason Morgan.

1969 Armstrong pisa suelo lunar. Wasserburg determina la edad de la Luna.

1970 Primer trabajo de K. Wilson con el grupo de renormalización.
Descubrimiento del receptor de la acetilcolina por el grupo de J.-P. Changeux.
Descubrimiento de las enzimas cortadoras de ADN por Smith, Wilcox y Kelly.

1971 Primeras moléculas extragalácticas por Weliachew.
Explicación de la turbulencia mediante la teoría de Ruelle y Takens.

1972 Inicio de la ingeniería genética con Jackson, Symours y Berg.

1973 Changeux, Courrège y Danchin proponen la teoría de la estabilización por epigénesis selectiva del cerebro.
Descubrimiento de los cuasicristales.

1974 Rowland y Molina muestran el papel de los compuestos clorados en la destrucción de la capa de ozono.

1975 Desarrollo de los estudios sobre la materia blanda.
Libro sobre la geometría fractal de la naturaleza por Mandelbrot.

1976 Sheppard y Judo realizan demostraciones de la materialidad de las representaciones mentales.
Misión Viking "de amarizaje" en Marte.

1977 Descubrimiento de los genes homeóticos por Lewis, Nuesslein-Volhard y Weischauss.
Primera microcomputadora Apple.

1978 Misión Pioneer hacia Venus y Mercurio.
Nacimiento de las supermoléculas con J.-M. Lehn.

1979 Misión Voyager 1 y 2 hacia Júpiter.

1980 Experimentos de reacción química a escala del nanosegundo.
Trabajos paralelos de Feigenbaum, Coullet y Tresser sobre la universalidad de los doblamientos de periodo.
Hipótesis de L. y W. Alvarez sobre la desaparición de los dinosaurios por el impacto de un meteorito hace 65 millones de años.
Misión Voyager 2 hacia Saturno.

1982 Experimento de Lichbacher sobre los doblamientos de periodo en los fenómenos de convección.

1983 Computadora neuronal de Hopfield
El megabario es obtenido en la célula de diamante por D. Mao.
Microscopio de efecto túnel por Binning y Rhrer.

1985 Multiplicación del ADN *in vitro* por Kary Mullis.

1986 Bednorz y Muller fabrican superconductores a "altas temperaturas".

ÍNDICE

Introducción ¿La ciencia fuera de la conciencia? 7

I. Querido siglo XIX... 15
El siglo bello 15
Mecánica 16
Termodinámica 18
Física estadística 20
Óptica 21
Electromagnetismo 23
¿El fin de la física? 26
Química ("primitiva") 27
Geología 30
Biología 32
II. Los fuegos artificiales de principios delsiglo XX 37
Los tubos de vacío 38
Los rayos X 39
El electrón 39
Radioactividad 40
Radioactividad y geología 41
Los cuantos de energía 42
El átomo de Bohr 43
La mecánica cuántica 45
Estadística cuántica 47
Relatividad 48
La Química y los cuantos 50
Valencia 51
La Sismología 53
Deriva de los continentes 54
La biología moderna en germen 56
Genética 56
Bioquímica 57
III. 0, 1... y el infinito 60
El código binario 60
¿Numérico o analógico? 61
Historia de la computadora 62
Transistor 64

Computadoras 66
"Como siempre, el negocio" 66
Paralelismo 67
De lo micro a lo nano 68
Rapidez y calor 69
Lenguajes 69
Lógica de lo imprevisto 71
IV. La doble hélice 73
ADN 73
Reproducción celular 74
Reproducción 75
La fábrica molecular 77
De la bacteria al elefante 79
Evolución 81
Prospectiva 82
La manipulación molecular 83
Bioquímica 85
Ingeniería genética 86
Inmunología 87
Biología moderna 89
Ética 90
Historia 91
V. La información 93
Información 93
Codificación 94
De la información a la comunicación 95
Entropía e información 97
Música e información 98
Informática 100
Tomografía 101
Cibernética 102
Biocibernética 103
VI. Cuánticos 106
Óptica cuántica 107
Espectroscopía 108
Moléculas y luz 109
Láser 110
Electrodinámica cuántica 111
La física de los sólidos 112
Sólidos "premecánicos-cuánticos" 113
Bandas de energía 115
Superconductividad 116

Defectos 118
El núcleo de la "preguerra" 118
La bomba 120
Colisiones nucleares 122
Antimateria 123
De los cuantos a los quarks 124
Cromodinámica cuántica 126
Las cuerdas 127
VII. La explosión química 130
Química cuántica 130
Química y física 132
Moléculas 133
Química del carbono y química orgánica 134
Síntesis química 135
Análisis químico 137
De la petroquímica a la bioquímica 137
Química de sólidos 138
Cuasicristales 140
Superconductores 141
Química supermolecular 142
Femtoquímica 143
Catálisis 144
VIII. Cosmos 146
La dilatación del espacio 147
Las estrellas 147
Astrofísica 148
Nucleosíntesis 149
Vida y muerte de una estrella 151
Exploradores del cielo 153
La dilatación del tiempo 155
Big Bang 156
Los tres primeros minutos del Universo 157
¿Cuándo se produjo el Big Bang? 158
Espuma de universo 160
IX. La Tierra como sistema 162
Radiocronología 162
Paleobiología 164
Tectónica de placas 167
Océanos-continentes 168
Geología 169
Geodinámica 171
Planetología 174

El origen de la Tierra 176
Geología isotópica 177
Climatología 179
Geocibernética 180
Ecología 180
X. El orden del caos 183
Química del desequilibrio 184
Grupo de renormalización 185
Materia blanda 188
Los fractales 190
Mecánica de fluidos 192
Meteorología 193
Turbulencia 194
Atractores extraños 195
Convección 196
La fiebre del caos 198
XI. Neuronales 201
Complejidad 201
Transmisión nervioso 203
Señales eléctricas 204
Neuroquímica 205
Aritmética neuronal 206
Cerebro 207
Cartografía y homúnculo 209
Cerebro y computadora 212
Los objetos mentales 213
El pensamiento 214
Epigénesis 215
Cognética 216
Evolución neuronal 218
XII. La derrota de Platón 221
Vida, materia, química 221
Historia 222
Contingencia 223
Complejidad 223
Naturaleza y artefacto 225
Los ritmos del descubrimiento 226
El surgimiento de las ideas nueva 227
La ciencia inmersa en la Historia 229
La alternancia fecunda 230
El Azar, lo Imprevisto 232
Observación y experimentación 233

Modelo y matemáticas 234
Matemáticas y naturaleza 235
La herramienta matemática 237
Ideas falsas y HOLD-UP platónico 238
Ciencias humanas 240
Combinatoria, síntesis e imaginación 241

Epílogo ¿Qué pasará en el siglo XXI? 245

Agradecimientos 251

Cronología 1895-1986 253

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en los talleres de Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), calzada de San Lorenzo 244, 09830 México, D.F., en el mes de febrero de 2003.

Se tiraron 2 000 ejemplares

Corrección: *Blanca Luz Pulido*

Preprensa: *Alta Resolución*

Cuidado de la edición: *Guillermo Hagg y Saab*

Esta edición ha sido coordinada por
María del Carmen Farías

Gracias a la habilidad que alcanzó el ser humano de poder manipular la naturaleza a lo largo del siglo XX, los misterios de la vida comenzaron a develar sus secretos. Esa centuria dio nuevos y diferentes bríos al árbol de la ciencia, que, no precisamente por antiguo, había dejado de dar sorpresas, y lo hizo en sus diversas manifestaciones, entre ellas la química, dominio del conocimiento en el que se encierra el reino de la combinatoria creadora. Lo mismo puede decirse de la biología, de la física, de la astronomía, de la electrónica, de las matemáticas, etcétera. Esta transformación del saber es lo que, en opinión de Claude Allègre, ha hecho que la historia natural complete a la historia humana, que se escinda la tradicional división fronteriza entre las ciencias humanas y las ciencias naturales y que se pueda hablar de una derrota de Platón —esto es, del tradicional conocimiento platónico anterior al siglo XX— en el sentido de que sí es posible captar la realidad, la única que conocemos hasta el momento, que es la de la materia que nos rodea y de la cual formamos parte.

Diseño de portada: Laura Esponda Aguilar

FERIA
CHILENA DEL LIBRO
SANTIAGO - HUERFANOS # 623
FONOS : 345 83 15 - 345 83 16

www.fce.com.mx
9 789681 668181